

LÄMMINVALKOINEN LED-VALO RUUKKUSALAATIN (*Lactuca sativa* L.) KASVIHUONEVILJELYSSÄ

Krista Kauste
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Puutarhatiede
2012

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Krista Kauste			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Lämminvalkoinen LED-valo ruukkusalaatin (<i>Lactuca sativa</i> L.) kasvihuoneviljelyssä			
Oppiaine — Läroämne — Subject Puutarhatiede			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma	Aika — Datum — Month and year 11/2012	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 62s.	
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Tämän tutkimuksen tavoitteena oli vertailla lämminvalkoista LED-valoa ja suurpainenatrium (HPS) -valaisinta ruukkusalaatin kasvihuoneviljelyssä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten LED-valaisin sopisi kasvihuoneviljelyyn ruukkusalaatin lisävalonlähteenä verrattuna HPS-valaisimeen. Tutkimuksen kohteena oli jääsalaatin (‘Frillice’) ja tammenlehtisalaatin (‘Rouxai’) kasvu ja ulkoinen laatu, valaisimen vaikutus kasvuston lämpötilaan sekä LED- ja HPS-valaisimien sähkönkulutus. Punalehtisellä tammenlehtisalaatilla tutkittiin myös valaisimen vaikutusta lehtien punaisen värin muodostumiseen. Lehdenreunapolte oli toinen tekijä, jolla mitattiin valaisimen vaikutusta salaatin ulkoiseen laatuun. Tutkimuksessa oli myös mukana LED-valaisimeen liitetty DLC-sensori (Dynamic Light Control), jonka tarkoituksena oli optimoida valotus vallitsevan luonnonsäteilyn mukaan.</p> <p>Salaattien kasvu ei eronnut HPS- ja LED-käsittelyjen välillä jääsalaatilla säteilysummien ollessa yhtä suuret. Valon laatu tai kasvustossa havaitut erot lämpötilassa ja ilmankosteudessa eivät vaikuttaneet merkittävästi jääsalaatin tuorepainon kehitykseen tai ulkoiseen laatuun. Tammenlehtisalaatilla LED-käsittelyn salaattit jäivät huomattavasti pienemmiksi ja lehdenreunapoltetta esiintyi enemmän yhtä suuresta säteilysummasta huolimatta. HPS-valaisimen alla oli selkeästi lämpimämpää ja kuivempaa, mikä näyttäisi vaikuttaneen salaattien haihdutukseen. Tammenlehtisalaattien lehtien antosyaanipitoisuuksissa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa.</p> <p>LED-valaisin kulutti noin 22% vähemmän sähköä kuin HPS-valaisin kummassakin kokeessa. Energiatehokkuutta HPS-valaisimen kanssa ei voi kuitenkaan suoraan vertailla, sillä HPS-valaisimen valo lankesi kokeissa paljon isommalle alalle kuin LED-valaisimen valo. DLC-sensori vähensi sähkönkulutusta ja tasoitti kasvien saamaa säteilyä, mutta se ei osoittautunut hyödylliseksi verrattaessa sähkönkulutusta salaatin tuorepainon kehitykseen LED-valaisimien välillä.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords LED, kasvihuonetuotanto, jääsalaatti, tammenlehtisalaatti, valon laatu, antosyaanipitoisuus, lehdenreunapolte, energiatehokkuus			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Ohjaajat; Timo Hytönen ja Paula Elomaa			

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Kauste Krista Maria			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Warm White LED in the greenhouse production of lettuce (<i>Lactuca Sativa</i> L.)			
Oppiaine — Läroämne — Subject Horticultural Science			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis	Aika — Datum — Month and year 11/12/2012	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 62p.	
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>The aim of this study was to compare warm white LED and High Pressure Sodium (HPS) -lamps in the greenhouse cultivation of lettuce. Two experiments were carried out in which lettuce growth and external quality was observed, the effect of lamps on leaf temperature was measured and the electricity consumption of LED- and HPS-lamps was compared. First experiment carried out with iceberg lettuce ('Frislice') and second experiment with red oakleaf lettuce ('Rouxai'). In the second experiment, the effect of light treatment on the color of leaves was also investigated. The presence of tipburn was another measurement of external quality in both experiments. LED-lamp with DLC-sensor (Dynamic Light Control), which was designed to optimize the illumination according to the existing natural light, was also included in the experiments.</p> <p>Light quality or observed differences in temperatures or relative humidity did not significantly affect the fresh weight or external quality of ice berg lettuce. Oakleaf lettuces grown under LED-light were much smaller and they had more tipburn symptoms compared to HPS-treatment. No significant differences were found in the anthocyanin levels of oakleaf lettuce grown under different lightning treatments.</p> <p>LED-lighting consumed about 22% less electricity than HPS-lamp in both experiments. However, energy efficiency of HPS- and LED-lamps cannot be directly compared, since HPS-lamps illuminated larger area than the LED- luminaires. DLC-sensor was able to adjust illumination according to natural light and to reduce energy consumption, but it did not increase fresh weight accumulation in relation to power consumption compared to LED-luminaire without DLC.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords LED, greenhouse production, Iceberg lettuce, oakleaf lettuce, quality of light, tipburn, energy efficiency			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisors; Timo Hytönen and Paula Elomaa			

SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	7
2 KIRJALLISUUSKATSAUS.....	8
2.1 Ympäri vuotinen kasvihuonetuotanto Suomessa – lisävalon käyttö edellytyksenä.....	8
2.2. Valo energian lähteenä.....	9
2.3 Valo informaation lähteenä.....	10
2.3.1 Fytokromit.....	10
2.3.2 Kryptokromit.....	12
2.3.3 Fototropiinit (ja muut LOV-proteiinit).....	12
2.3.4 UV-B- valon valoreseptori.....	13
2.3.5 Vihreän valon aiheuttamat vasteet kasveilla.....	13
2.3 Valotus ja ruukkusalaatinviljely kasvihuoneessa.....	14
2.3.1 Valon intensiteetti.....	14
2.3.2 Valojakso.....	15
2.3.3 Valon laatu.....	16
2.3.4 Valotuksen vaikutus haihdutukseen.....	18
2.4 Pääasialliset lisävalonlähteet kasvihuonetuotannossa nyt ja tulevaisuudessa.....	19
2.4.1 Lämpöä säteilevät valaisimet.....	19
2.4.2 Kaasussa tai kaasuseoksessa tapahtuvan elektronipurkauksen avulla saatava valo.....	20
2.4.3 Puolijohde-, eli LED-valaisimet.....	21
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET.....	22
4 AINEISTO JA MENETELMÄT.....	23
4.1 Kasvimateriaali.....	23
4.2 Valaisimet.....	24
4.2.1 LED- valojen ja DLC- sensorin tekninen toteutus.....	24
4.2.2 Valon laatu ja intensiteetti.....	25
4.2.3 Datan taltiointi ja valojärjestelmän ohjaus.....	27
4.3 Koejärjestelyt.....	28
4.3.1 Kastelu ja lannoitus.....	28
4.3.2 Kasvuolosuhteet.....	29
4.4 Mittaukset ja havainnointi.....	29
4.4.1 Kasvun mittaaminen.....	29

4.4.2 Lehdenreunapoltteen arviointi.....	29
4.4.3 Lämpötilamittaukset.....	30
4.4.4 Antosyanien määrittäminen.....	31
4.4.5 Tilastolliset analyysit.....	32
5 TULOKSET.....	33
5.1 Kasvu.....	33
5.1.1 Tuorepaino.....	33
5.1.2 Kuivapaino.....	34
5.1.3 Lehtien lukumäärä.....	36
5.1.4 Salaattien korkeus.....	36
5.2 Lehdenreunapolte.....	36
5.3 Antosyaanipitoisuus.....	38
5.4 Valon määrä.....	39
5.4.1 Säteilysummat ja luonnonvalon osuus.....	39
5.5 Sähkönkulutus.....	40
5.6 Valaisimen vaikutus kasvuston lämpötilaan.....	41
5.6.1 Ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus kasvustossa.....	41
6 TULOSTEN TARKASTELU.....	43
6.1 Valon määrän ja laadun vaikutus kasvuun.....	43
6.1.1 Tuorepaino.....	43
6.1.2 Kuivapaino.....	45
6.1.3 Lehtien lukumäärä ja salaattien korkeus.....	45
6.2 Salaattien ulkoinen laatu.....	45
6.2.1 Lehdenreunapolte.....	45
6.2.2 Antosyaanipitoisuus.....	46
6.3 DLC- sensori ja sähkönkulutus.....	47
7 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	48
8 KIITOKSET.....	50
9 LÄHTEET.....	50
 LIITE 1 & 2 KASTELUVEDEN PH-ARVON, LÄMPÖTILAN JA JOHTOLUVUN SEURANTA ENSIMMÄISEN KOKEEN AIKANA.....	 57
 LIITE 3 KAUPPAPUUTARHALIITON RUUKKUVIHANNESJAOSTON LAATUOHJE LEHDENREUNAPOLTTEEN ARVIOINTIIN.....	 59

LIITE 4 INFRAPUNAKAMERAKUVIA JÄÄSALAATIN LEHDEN- LÄMPÖTILOISTA.....	60
LIITE 5 KUVAAJAT KASTELUVEDEN LÄMPÖTILOJEN KEHITYKSESTÄ..	62

LYHENTEET JA SYMBOLIT

Cry1-2	Kryptokromit 1-2
B	Blue (sininen valo)
FR	Far-Red (kaukopunainen valo)
DLC	Dynamic Light Control
HIR	High Irradiance Response
HPS	High Pressure Sodium
LFR	Low Fluence Response
LED	Light Emitting Diode
LOV	Regulated by Light, Oxygen or Voltage
nm	Nanometri
PAR	Photosynthetically Active Radiation
Pfr	Fytokromin biologisesti aktiivinen muoto
PSII	Photosystem II
Phot 1-2	Fototropiinit 1-2
PhyA-E	Fytokromit A-E
PPF	Photosynthetic Photon Flux
Pr	Fytokromin biologisesti passiivinen muoto
R	Red (punainen valo)
R:FR	Punaisen (R) ja kaukopunaisen (FR) valon suhde
ROS	Reactive Oxygen Species
UV-A	Ultravioletti- A säteily
UV-B	Ultravioletti- B säteily
UVR8	UV-valon valoreseptori
VLFR	Very Low Fluence Response
VPD	Vapour Pressure Deficit
ZTL	Zeitlupe

1 JOHDANTO

Suomessa ympärivuotisen kasvihuoneviljelyn edellytyksenä on keinovalon käyttö luonnonvalon lisäksi. Viime vuosina voimakkaasti nousseet energiakustannukset ovat luoneet tarvetta kehittää energiatehokkaampia valotusratkaisuja kasvihuoneisiin. Kasvit käyttävät valoa energian, mutta myös informaation lähteenä. Fotosynteesin kannalta oleelliset valon aallonpituudet sijoittuvat 400-700nm väliin. Informaation kannalta tärkeitä valon aallonpituuksia ovat 280-800nm välinen alue. Myös infrapunasäteillä saattaa olla merkitystä ainakin niiden lämpövaikutuksen vuoksi.

Optimaalisen kasvun takaamiseksi kasvihuoneessa on oleellista huomioida valon intensiteetti, laatu, ja valojakso. Tällä hetkellä käytetyin kasvihuonevalaisin Suomessa on suurpainenatrium -lamppu (HPS). HPS-valaisimen spektri ei kuitenkaan ole kasville optimaalinen, polttimot ovat suhteellisen lyhytikäisiä ja niiden energiatehokkuus on huono. Suurin osa lampun käyttämästä energiasta kuluu lämmöntuottoon. Puolijohde- eli, LED-valaisimet saattavat tarjota tulevaisuudessa vaihtoehtoisen ratkaisun kasvihuoneiden lisävalon lähteenä. Niiden etuina on pitkä käyttöikä, hyvä hyötysuhde ja mahdollisuus asettaa valon spektri halutunlaiseksi.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli vertailla lämminvalkoista LED-valoa ja HPS-valaisinta ruukkusalaatin kasvihuoneviljelyssä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten LED-valaisin sopisi kasvihuoneviljelyyn ruukkusalaatin lisävalonlähteenä verrattuna HPS -valaisimeen. Tutkimuksen kohteena oli salaatin kasvu ja ulkoinen laatu, valaisimen vaikutus kasvuston lämpötilaan sekä LED- ja HPS-valaisimien sähkönkulutus. Tutkimuksessa oli myös mukana DLC-sensori (Dynamic Light Control) liitettynä LED-valaisimeen, jonka tarkoituksena oli optimoida valotus vallitsevan luonnonsäteilyn mukaan. Tämä tutkimus oli osa SSH Lighting -projektia (Solid-state horticultural lightning system, puolijohdevalaistusjärjestelmä kasvihuoneviljelyyn), Aalto Yliopiston ja Helsingin yliopiston yhteistyöhanketta, jossa tavoitteena on kehittää ympärivuotiseen kasvihuonetuotantoon sopivaa LED-valaistusta.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Ympärivuotinen kasvihuonetuotanto Suomessa – lisävalon käyttö edellytyksenä

Kasvihuoneessa tuotettujen vihannesten osuus koko vihannestuotannossa Suomessa on kasvanut selvästi viime vuosikymmenien aikana (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2011). Pääasiallisena syynä tähän on kasvihuoneiden ympärivuotinen käyttö, jonka mahdollistaa käytännössä valotus. Vuonna 2010 valotettu kasvihuoneala Suomessa oli noin 42 hehtaaria, josta noin 25 hehtaaria ruukkuvihannestuotantoa.

Ruukkusalaatti on Suomen kolmanneksi viljeltyin kasvihuonevihannes ja vuonna 2010 sitä tuotettiin ennätyselliset 63 miljoonaa ruukkua (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2011). Kasvu on ollut huomattavaa – vuonna 2000 tuotettiin vajaa 40 miljoonaa ruukkua ruukkusalaattia. Pehmeää keräsalaattia viljeltiin vuonna 2010 kasvihuoneissa ennätyselliset 1,6 miljoonaa kiloa. Myös muiden ruukkuvihannesten tuotanto Suomessa on kasvanut selvästi ja valikoima laajentunut viimeisen kymmenen vuoden aikana.

Ruukkuvihannesten viljelyala myös kasvoi viime vuonna 25 hehtaariin (23 ha vuonna 2009), josta käytännössä koko ala oli valotettua (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2011). Valotukseen liittyvät kustannukset ovat myös yksi suurimmista kulueristä kasvihuonetuotannossa, kattaen jopa 30% kokonaiskustannuksista (Pinho 2008). Energian hinnan kohoaminen onkin yksi oleellisimmista kysymyksistä kasvihuonetuotannon kannattavuuden kannalta ja energiatehokkaammille valotusratkaisuille on tarvetta.

Kasvihuoneissa on mahdollista kontrolloida ympäristötekijöitä niin, että saadaan maksimoitua sadontuotanto ja hyvä laatu (Folta & Kayla 2008, Massa ym. 2008). Manipuloimalla valo-olosuhteita pystytään muun muassa tehostamaan fotosynteesiä ja vaikuttamaan kasvin arkkitehtuuriin ja fysiologisiin muutoksiin (Folta & Kayla 2008, Moe 1997). Valo-olosuhteet vaikuttavat myös erilaisten kasvihuoneessa esiintyvien (tuho)hyönteisten elinkiertoon ja kasvin sekundäärimetaboliittien tuotantoon, joilla on

myös merkitystä sadon määrän ja laadun kannalta (Autio & Voipio 1994, Vänninen ym. 2010).

Pohjoisilla leveysasteilla, kuten Suomessa, lisävalo on talvikuukausina kasvien pääasiallinen valonlähde, jolloin sen merkitys kasvin kasvulle ja kehitykselle on hyvin merkittävä. Keskeisimmät tekijät, jotka täytyy ottaa huomioon kasvihuoneen valoja valittaessa, ovat valon laatu, intensiteetti, valojakso ja valojen sijoitus (Moe, 1997). Näiden tekijöiden lisäksi myös lamppujen energian kulutus verrattuna tuotettuun satoon tulee huomioida.

2.2 Valo energian lähteenä

Valo toimii kasville niin energian kuin informaationkin lähteenä (Kendrick & Kronenberg 1994, Taiz & Zeiger, 2006). Fotosynteesin, ja sitä kautta kuiva-aineen kertymisen, kannalta oleellista on niin sanottu PAR-valo (photosynthetically active radiation) joka sijoittuu 400-700nm aallonpituuksien alueelle. Klorofyllien tärkeimmät absorptiopiikit sijoittuvat sinisen ja punaisen valon aallonpituuksien alueille, joita pidetään fotosynteesin kannalta merkityksellisimpinä valon aallonpituusalueina. Fotosynteesin tehokkuuden kannalta lisävalon laadussa tulisi ottaa huomioon nämä seikat. Nykytietämyksen mukaan myös vihreällä valolla on positiivinen kokonaisvaikutus fotosynteesiin, sillä se lisää yhteyttämistä lehtien sisimmissä osissa (Sun ym. 1998, Terashima ym. 2009).

Valon intensiteetti, eli valoteho, on myös oleellista fotosynteesin tehokkuuden kannalta (Taiz & Zeiger 2006). Mitä enemmän fotoneita on klorofylleille tarjolla, sitä enemmän kasvi pystyy tuottamaan energiaa ja biomassaa. Viljelijän täytyy myös huomioida valojen sijoittelu; kasvista riippuen lamppujen korkeus ja etäisyys toisistaan määritetään niin, että saavutetaan halutunlainen valon intensiteetti kasvustoon (Moe, 1997). Esimerkiksi kurkulla käytetään myös välivalotusta, eli asetetaan osa lampuista kasvustojen väliin, jolloin myös alemmat lehdet saavat valoa tehokkaampaan yhteyttämiseen (Hovi ym. 2004, Trouwborst ym. 2010).

Myös valojakso, eli kauanko valot ovat päällä päivittäin, vaikuttaa fotosynteesin kautta kasvuun. (Taiz & Zeiger 2006). Toisaalta tehot ja valotusaika maksavat ja viljelijän

täytyy optimoida sähkönkulutus ja kasvu niin, että lopputulos on taloudellisesti kannattava (Pinho 2008).

2.3 Valo informaation lähteenä

Valo toimii kasveille myös informaation lähteenä ympäristössä tapahtuvista muutoksista (Kendrick 1994, Taiz & Zeiger 2006). Kasvi havaitse valon eri aallonpituuksia valoreseptoreilla, jonka seurauksena kasvissa tapahtuu fysiologisia muutoksia. Tätä kutsutaan fotomorfogeneesiksi ja sen kannalta tärkeä valon aallonpituuksien alue on aina UV-valosta lähtien kaukopunaisen valon aallonpituuksiin (280-800nm). Valo voi olla kasveille myös vaarallista, kuten UV-B – säteily, joka vaurioittaa soluja ja herkkää fotosynteesikoneistoa (Kim ym. 1998).

Kasvihuonetuotannossa valon optimaalinen laatu riippuu viljeltävästä kasvista ja sadontuoton tavoitteista; onko tavoitteena pelkkä biomassan tuotanto, kuten ruukkusalaatilla, vai halutaanko kompakteja ja runsaasti kukkivia ruukkukasveja vai mahdollisimman paljon hedelmiä, kuten esimerkiksi kurkulla tai tomaatilla? (Whitelam & Halliday 2007). Erityisesti syötävillä-, mutta myös koristekasveilla, korostuu kasvin sisäisen laadun ja kauppakestävyyden merkitys, mihin voidaan myös vaikuttaa valon laadulla (Rajapakse ym. 1995, Schmitz-Eiberger & Noga 2001, Bulle 2005). Kasvien valoreseptoreita ovat fytokromit (puna- ja kaukopunainen valo), kryptokromit ja fototropiinit sekä muut LOV-alueen sisältävät proteiinit (UV-A- ja sininen valo) sekä UV-B -valoa aistivat proteiinit (Kendrick & Krinenberg 1994, Taiz & Zeiger 2006).

2.3.1 Fytokromit

Fytokromit ovat punaisen (R) ja kaukopunaisen (FR) valon reseptoreita, jotka koostuvat kahdesta noin 120kDa:n kokoisesta proteiinista. Ne esiintyvät kahdessa eri fysiologisessa muodossa (Kendrick & Kronenberg 1994, Quail ym. 1995). Fytokromin Pr-muoto on inaktiivinen, joka muuttuu punaisen valon vaikutuksesta aktiiviseen Pfr-muotoon. Vastaavasti, Pfr-muoto vaihtuu kaukopunaisen valon vaikutuksesta takaisin inaktiiviseen Pr-muotoon. Fytokromivasteet ovat siis punaisen (600-700nm) valon indusoimia ja kaukopunaisen (700-800 nm) valon inhiboimia.

Nykyisin tiedetään, että lituruoholta (*Arabidopsis thaliana*) löytyy viisi eri fytochromia; phyA, B, C, D ja E (Sharrock ym. 1989, Clack ym. 1994). PhyA on niin sanotusti valolabiili, eli se hajoaa valossa ja reagoi erityisesti kaukopunaiseen, mutta myös vihreään valoon. PhyB-E taas ovat valostabiileja, eli eivät hajoa valossa ja reagoivat ensisijaisesti punaiseen valoon. Niiden vasteet ovat palautuvia, toisin kuin phyA:n vasteet (Kendrick & Kronenberg 1994).

Punainen ja kaukopunainen valo vaikuttaa kasvien kasvuun ja kehitykseen koko niiden elinkierron läpi, välittäen kasville informaatiota niin vuorokauden, vuodenajan kuin ympärillä tapahtuvan tilan muutoksista. (Chory ym. 1996, Mathews 2006). Fytokromivasteet, voidaan jakaa eri luokkiin tarvittavan säteilysumman perusteella (Kendrick & Kronenberg 1994).

Erittäin alhaisen säteilyn vasteet (Very Low Fluence Response, VLFR) indusoituvat tehokkaasti jo hyvin matalalla säteilyn intensiteetin tasolla ($<0,1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Vasteet eivät ole palautuvia, mutta niitä voi indusoida punaisen valon lisäksi myös kaukopunainen ja vihreä valo.

Alhaisen säteilyn vasteet (Low fluence response, LFR) indusoituvat tehokkaasti jo hyvin lyhyeenkin punaisen valon säteilyn seurauksena ja vasteet ovat palautuvia kaukopunaisen valon vaikutuksesta. Tähän ryhmää kuuluu klassisimmat fytochromivasteet, kuten siementen itäminen, de-etioiloituminen ja itukoukun aukeaminen.

Voimakkaan säteilyn vasteet (High Irradiance Response, HIR) vaativat pitkäaikaista altistumista korkean intensiteetin säteilylle, eivätkä vasteet ole palautuvia. Punaisen valon lisäksi Myös UV-A-, UV-B, sininen ja kaukopunainen valo voivat aiheuttaa vasteita

R:FR-suhde kertoo kasveille naapurikasvien läsnäolosta tai varjosta ohjaten kasvua parempiin valo-olosuhteisiin. Klorofylliä sisältävät kudokset heijastavat kaukopunaisen (FR) valon säteitä ja absorboivat suurimman osan punaisista (R) valon säteistä. Fytokromi reagoi näiden säteiden väliseen suhteeseen ja aiheuttaa kasvissa fysiologisen vasteen; punaisen valon osuus laskee tiheän kasvuston takia, jolloin fytochromin inaktiivinen Pr-muoto on vallitsevana ja pituuskasvua hillitsevä vaste heikkenee. Tätä sanotaan varjon välttämiseksi ja siihen kuuluu varren venyminen, pienentynyt lehtiala ja

ohuempi lehti, vähentynyt klorofyllin synteesi, vahvistunut apikaalidominanssi, alhaisempi kuiva-aine pitoisuus, aikaistunut kukinta, lyhentynyt hedelmien ikä ja vähentynyt sokereiden varastoiminen varastoelimiin (Smith & Whitelam 1997). R:FR-suhde on ehkä dramaattisin kasvien kasvua ja kehitystä ohjaava tekijä, jonka päätarkoituksena on auttaa kasvia pärjäämään kilpailussa elintilasta ja reagoimaan nopeastikin ympäristön muutoksiin, kuten varjostaviin naapurikasveihin, ennen kuin on liian myöhäistä (Franklin 2008).

2.3.2 Kryptokromit

Kryptokromit ovat valoreseptoreita, jotka aistivat UV-A (320-390 nm) ja sinisen (390-500nm) valon aallonpituuksia (Kendrick & Kronenberg 1994). Vuonna 1993 Margaret Ahmad ja Anthony Cashmore eristivät ensimmäisen kryptokromin, cry1:n (alun perin *hy4*) lituruohosta (Ahmad ym. 1993, Lin ym. 1995). Myöhemmin lituruohosta eristettiin myös toinen kryptokromi, cry2 (Lin ym. 1996).

Shalitin ym. (2002) todistivat cry2:n fosforyloituvan sinisen valon vaikutuksesta ja lopulta hajoavan. Pimeässä cry2 on inaktiivinen ja stabiili. Myös Cry1 fosforyloituu sinisen valon vaikutuksesta, mutta proteiini ei kuitenkaan hajoa (Shalitin ym. 2003). Kryptokromivasteita kasvilla ovat kukinnan ajoitus, valojakson havaitseminen ja varren pituuskasvun hillitseminen (Banerjee & Batschauer 2005).

2.3.3 Fototropiinit ja muut LOV-proteiinit

Fototropiineja on tähän asti löydetty kahta eri tyyppiä; phot1 ja phot2 (Christie ym. 1999). Fototropiinit kontrolloivat kasvien ”liikehdintää”; fototropismia, huulisolujen aukioloa ja kloroplastien liikkumista, joko kohti kirkkaampaa valoa tai pois liian kirkkaasta valosta. (Briggs 1963)

Muita LOV-alueen omaavia, fotoreseptoreina toimivia proteiineja löytyy niin sanotusta ZEITLUPE-ryhmästä (Imaizumi ym. 2003). Tähän mennessä niitä on löydetty kolme; ZTL, FKF1 ja LKP2. ZTL-proteiinit (saksaksi Zeittluppen = ”slow motion”) vastaavat lähinnä kasvin vuorokausirytmien säätelyä (circadian clock) (Somers ym. 2000). FKF1 taas säätelee *CONSTANS*-geenin kanssa valojaksosta riippuvaista kukinnan alkamista ja

LKP2:lla on osuutensa kumpaankin edellä mainittuun tapahtumaan (Imaizumi ym. 2003, Schultz ym. 2001).

2.3.4 UV-B -valon valoreseptori

UV-B -valon valoreseptoreista ja niiden aiheuttamista signaalireiteistä tiedetään suhteellisen vähän, verrattuna esimerkiksi punaisen/kaukopunaisen ja sinisen/UV-A-valon valoreseptoreihin. Fytokromin (phyA ja phyB) oletetaan aistivan UV-B -säteilyä, mutta äskettäin löydettiin täysin uusi fotoreseptori, UVR8-proteiini, jonka uskotaan toimivan UV-B -valon fotoreseptorina (Kim ym. 1998, Luca ym. 2011). Kasvit altistuvat luonnossa UV-säteilylle (290-390nm), joka toimii signaalina fysiologisille muutoksille, mutta on myös haitallista kasveille (Kim ym. 1998). Vallitsevan tietämyksen mukaan kasveilla on kaksi eri signaalireittiä reagoida UV-B -valoon; stressi- tai fotomorfogeneettinen vaste.

Voimakkaassa UV-B -valossa kasvin solukoissa alkaa muodostua ROS (Reactive Oxygen Species) -yhdisteitä, eli haitallisia happiradikaaleja (Mackerness 2000). ROS-yhdisteet aiheuttavat kasvissa hypersensitiivisen stressireaktion, eli yleisen puolustusreaktion, joka auttaa selviytymään myös esimerkiksi tuhohyönteisten ja tautien hyökkäyksiltä. Alhaisemman UV-B -intensiteetin aiheuttamia vasteita, joita ovat esimerkiksi varren pituuskasvun väheneminen, kutsutaan fotomorfogeneettisiksi (Kim ym. 1998). UV-B -valon aikaansaama vaste on myös erilaisten antioksidanttien, kuten antosyaanien, muodostuminen (Braun & Tevini 1993). Nämä UV-suodattimiksikin kutsutut aineet sekä heijastavat haitallisia säteitä pois kasvin soluista, että hapettavat ROS-yhdisteitä, joita syntyy stressireaktioiden yhteydessä. UV-B -säteily myös hidastaa fotosynteesiä ja sitä kautta kasvua (Krizek ym. 1998, Mackerness 2000).

2.3.5 Vihreän valon aiheuttamat vasteet kasveilla

Vihreän valon (500-600nm) tiedetään hillitsevän punaisen ja sinisen valon vasteita (Folta & Maruhnich 2007). Sekä krypto- että fytokromit pystyvät aistimaan myös vihreitä valon aallonpituuksia, vaikkakin niiden tehokkuus prosessoida vihreää valoa ei ole yhtä hyvä kuin niiden kyky reagoida siniseen tai punaiseen valoon (Folta & Maruhnich 2007, Bouly ym. 2007). Tämän hetkisen käsityksen mukaan, että sininen ja vihreä valo saattavat toimia kuten punainen ja kaukopunainen valo, vaihdellen

fotoreseptorin aktiivista ja inaktiivista muotoa valon laadun mukaan (Banerjee ym. 2007, Folta & Maruhnich 2007).

Myös kryptokromin kautta havaitulla vihreällä valolla on ilmeisesti merkitystä naapurikasvien havaitsemisessa; vihreän valon heijastuessa naapurikasveista, sinisen ja vihreän valon suhde laskee, jolloin kryptokromin aktiivisen muodon määrä vähenee ja sen pituuskasvua hillitsevä vaikutus heikkenee (Folta & Maruhnich 2007, Sellaro ym. 2010). Tämä auttaa kasvia pääsemään edullisempiin valo-olosuhteisiin tihenevässä kasvustossa.

Myös valon laadulla voidaan vaikuttaa kasvin energian käyttöön, eli fotosynteesin tehokkuuteen. Sun ym. (1998) osoittivat vihreän valon edistävän fotosynteesiä lehtien sisässä, kun taas sininen ja punainen valo absorboidaan lehden pinnan kloroplasteissa. Terashima ym. (2009) ja Nishio (2000) uskovat tämän olevan kasvin strategia kerätä valoenergiaa niin heikossa kuin korkeassa valotasossa, mutta myös keinona hyödyntää koko lehden tilavuus fotosynteesin tehostamiseksi – sitoakseen tehokkaasti hiilidioksidia, kasvulla täytyy olla suhteellisen iso kloroplastien määrä lehtialaa kohden.

2.3 Valotus ja ruukkusalaatinviljely kasvihuoneessa

2.3.1 Valon intensiteetti

Valon intensiteetin lisäämisen on todettu lisäävän salaatin vegetatiivista kasvua, kuivapainoa ja lehtien lukumäärää sekä vähentävän lehtien venymistä (Ikeda ym. 1988, Inada & Yabumoto 1989, Ito 1989, Voipio & Autio 1991, Jokinen & Tahvonen 1991, Kitaya ym. 1998).

Valon intensiteetin suurentaminen tehostaa vegetatiivista kasvua salaatilla, mikäli hiilidioksidia on tarpeeksi tarjolla (Ikeda ym. 1988, Kitaya ym. 1998). Salaatin tuorepaino kasvoi lähes lineaarisesti 140, 210, 280 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ valotasolla, mutta 350 ja 420 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ välillä tuorepainon lisääntyminen hidastui (Ito 1989). Taloudellisesti järkevänä valonintensiteettinä voi tämän tutkimuksen perusteella pitää 280 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Myös Oda & Aoki (1988) totesivat kasvuvauhdin saturoituneen tuorepainon kehityksen perusteella 320 tai 410 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$:ssa lämpötilasta riippuen. Ikeda ym.(1988) mukaan

salaatin kasvuvauhti kiihtyi valon intensiteettiä lisättäessä, mutta hiilidioksidin lisääminen kiihdytti kasvua suhteessa enemmän alhaisella valotasolla ($137 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) kuin korkeammalla ($316 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Iton (1989) mukaan $200 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ valotasolla (fluoresenssi-lamppu valonlähteenä) korkein kasvuvauhti saavutettiin 600ppm CO_2 -pitoisuudella.

Shimizu ym. (2008) kehittivät mallin salaatin tuorepainon kehityksestä kasvihuoneolosuhteissa. Mallissa käytettiin kahta eri intensiteetin tasoa (140 ja $200 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) ja kahta CO_2 -pitoisuutta (400 ja $1200 \mu\text{molm}^{-1}$) 14 h valojaksolla ja 25°C lämpötilalla. Mallin perusteella intensiteetti on merkittävämpi kuin CO_2 -pitoisuus; $200 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ valotasolla 100 g tuorepaino saavutettiin CO_2 -pitoisuudesta huolimatta lähes yhtä nopeasti 23-25 päivässä. Hiukan pidempi aika kului, noin 27 päivää, alhaisella valotasolla ja korkealla CO_2 -pitoisuudella. Alhaisella intensiteetillä ja matalalla CO_2 -pitoisuudella kasvien tuorepaino oli 30 päivän jälkeen vain noin 70 g. Optimaalisin valostaso salaatile näyttäisi olevan noin $300 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, mutta muut ympäristötekijät, kuten lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus, vaikuttavat myös merkittävästi yhdessä valotason kanssa fotosynteesin tehokkuuteen.

Salaatin sisäisen laadun kannalta yksi tärkeimmistä tekijöistä on nitraattipitoisuus, joka ei saa ylittää Suomessa talvikuukausina 5000 mg/kg ja kesäkuukausina 4000 mg/kg raja-arvoja (Elintarviketurvallisuusvirasto Evira 2012). Liian alhaisen valotason tiedetään lisäävän salaatin nitraattipitoisuutta ja laskevan sokerien pitoisuutta (Blom-Zandstra & Lampe 1985). Alhainen sokeripitoisuus laskee myös kauppakestävyyttä monilla kasveilla (Enninghorst & Lippert 2003, Bulle 2005).

2.3.2 Valojakso

Valojakson tiedetään lisäävän kasvua ja kuiva-aineen tuottoa aina 24 h asti useimmilla kasveilla (Inada & Yabumoto 1989, Jokinen & Tahvonen 1991). Toisaalta, jokaisella kasvilla on piste, jonka jälkeen lisävalotus ei ole enää (taloudellisesti) kannattavaa sen tuomaan lisäkasvuun nähden.

Salaatin tuorepaino kasvoi lineaarisesti päivänpituutta lisättäessä 12 tunnista 20 tuntiin valotasolla $320 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Inada & Yabumoto 1989). 20 ja 24 h välilläkin tuorepaino vielä lisääntyi, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Ikeda ym. (1988) mukaan,

intensiteetin ollessa sama ($237 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 24 h valojaksolla ja pienemmällä hiilidioksidipitoisuudella (400 ppm) samassa kasvatusajassa saatiin yhtä isoja salaatteja kuin 12 h valojaksolla ja korkeammalla hiilidioksidipitoisuudella (2100 ppm). He totesivat valojakson pitenemisen alentavan salaatin nettofotosynteesiä samalla valon intensiteetin tasolla. Kitaya ym. (1998) totesivat salaatin kuivapainon lisääntyneen samalla valotasolla 25% kun valojaksoa pidennettiin 16 tunnista 24 tuntiin. Kun hiilidioksidipitoisuutta vielä lisättiin 400 ppm:stä 800 ppm:ään, nousi kuivapaino samalla valotasolla 100%. Kuivapaino nousi lineaarisesti päivittäisen valomäärän lisääntyessä kummallakin hiilidioksidipitoisuudella valotason ollessa $100\text{--}300 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Yhteenvetona näyttäisi tutkimustulosten perusteella siltä, että salaatin viljelyssä tehokkain valotusstrategia olisi $300 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ valotaso ja 18-20 h valojakso yhdistettynä hiilidioksidilannoitukseen. Valojakson pidentämisellä ja hiilidioksidipitoisuuden nostamisella voidaan myös kompensoida alhaisempaa valotasoa.

2.3.3 Valon laatu

Sinisen ja punaisen valon tiedetään olevan tärkeitä fotosynteesin ja sitä kautta kasvin kasvun ja kuiva-aineen kerääntymisen kannalta (Inada & Yabumoto 1989). Sen sijaan punaisen ja kaukopunaisen valon suhde kontrolloi myös kasvin kasvun muotoa ja sokereiden allokaatiota eri kasvinosiin (Franklin 2008, Wang ym. 2009). Vihreän valon tiedetään edistävän fotosynteesiä lehden syvemmissä kerroksissa, mutta toisaalta ”kumoavan” sinisen valon vasteita, kuten huulisolujen aukioloa (Sun ym. 1998, Folta & Maruhnich 2007, Sellaro ym. 2010).) UV-B -valo heikentää fotosynteesin tehokkuutta, ilmeisesti rajoittamalla PSII:n (Photosystem II) toimintaa sisältämällään suurella energiamäärällä (Krizek ym. 1998). Punalehtisen salaatin kasvattaja saattaa kuitenkin myös hyötyä UV-B -valosta, erityisesti talvella, sillä se edistää antosyaanien tuotantoa, eli punaisen värin muodostumista (Autio & Voipio 1994, Braun & Tevini 1993).

Ito (1989) sai kokeissaan suurimmat salaatit HPS-valaisimella, jonka spektrin sinisen valon osuus oli nostettu 11% normaalin 7% sijaan. Salaatit, joiden saaman valon punaisen (R) ja sinisen (B) valon suhde (R:B) oli korkein ja punaisen ja kaukopunaisen (FR) valon suhde alhaisin (R:FR), tuottivat korkeimman tuorepainon (Inada &

Yabumoto 1989). Alhaisin tuorepaino kertyi salaateille joiden R:FR oli todella matala. Kuiva-aineen muodostuminen ja suhteellinen kasvuvauhti kasvoivat punaisen valon määrän kasvaessa. Edellä kuvatun kaltaisia tuloksia fytochromivasteista kasvuun on saatu baby leaf -salaatilla, jossa kaukopunaisen valon lisääminen viileän fluoresenssivalon spektriin, tuotti pisimmät varret ja lehdet sekä suurimman kuiva- ja tuorepainon (Qian & Kubota 2009). Vastaavasti, samassa tutkimuksessa UV-A- ja sinisen valon aallonpituuksia saaneilla baby leaf- salaateilla oli lyhyimmät varret ja lehdet.

Kim ym. (2004) tutkimuksessa oli tarkoituksena testata vihreän valon merkitystä salaatin kasvuun. Mikäli vihreää valoa ei ollut ollenkaan tarjolla tai sitä oli yli 50%, sekä salaattien koko, että tuorepainot jäivät alhaisemmiksi. Tutkijat päättelivät, että vihreän valon vaikutuksesta salaattien alalehtien fotosynteesi on tehokkaampaa, mutta liian suuri osuus vihreää valoa on kuitenkin energian haaskausta. Toisaalta, Dougher ja Bugbee (2001) totesivat ”keltaisen” valon (580-600 nm) vähentäneet salaatin kasvua. He tutkivat HPS- ja monimetalli-valaisimilla eri sinisen valon määrän vaikutusta salaatin kasvuun. Analysoimalla kummankin lampun valojakaumia suhteessa kasvun parametreihin ja klorofyllipitoisuuksiin, 200 ja 500 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ valotasolla, vain ”keltaisen” valon osuuden kasvaminen pystyi selittämään alhaisemman kasvun ja klorofyllipitoisuuden.

UV-A ja erityisesti UV-B -valon tiedetään alentavan fotosynteesiä (Mackerness 2000). Krizek ym. (1998) mukaan kesällä avomaalla luonnonsäteilyn UV-B -valon heijastaminen pois polyesterikalvolla tuotti 63% suuremman tuorepainon ja UV-A -valon heijastaminen pois tuotti vielä lisäksi 43% suuremman tuorepainon. Myös antosyaanipitoisuus laski kummankin, UV-B ja UV-A -valon puuttuessa salaateilta. Tsormpatsidis ym. (2008) saivat myös kokeissaan samansuuntaisia tuloksia. He päättelivät kuivapainon laskun johtuneen kasvaneesta antosyaanien määrästä kasveilla, jotka altistuivat UV-säteilylle. Antosyaanit absorboivat myös valon säteitä, mikä on saattanut vähentää klorofyllien absorboimien fotonien määrää, laskien fotosynteesiä. Heidän kokeissaan UV-säteet eivät vahingoittaneet fotosynteesikoneistoa.

Nykyisen tietämyksen mukaan näyttäisi siltä, että paras valon laatu salaatille kasvun kannalta olisi suhteellisen korkea R:FR- suhde, punaista valoa tulisi olla yli 60%, sinistä valoa noin 10% ja vihreää valoa myös hieman, maksimissaan 20%. Keltaista valoa tulisi

välttää ja kaukopunaista valoa tarvitaan hiukan, jotta fytochromi pystyy toimimaan normaalisti. UV-B -valoa kannattaa myös välttää, mikäli tavoitteena ei ole esimerkiksi punaisen värin muodostumisen lisääminen.

2.3.4 Valotuksen vaikutus haihdutukseen

Erityisesti vihanneksilla, jotka koostuvat suurimmaksi osaksi vedestä, voidaan tuorepainon kehitystä pitää tärkeänä kasvun indikaattorina (Oda & Aoki 1988). Salaatilla, jonka kuivapainon osuus pinta-alaan nähden on suuri, on haihdutuksen määrä oleellinen kasvun kannalta (van Iersel 2003). Valaisinlähteen käyttö vaikuttaa myös kasvuston mikroilmastoon ja sitä kautta haihdutukseen.

Salaatin tuorepaino saattaa laskea hetkellisesti tai pidempiaikaisesti säteilyn johdosta, jos lämpötila nousee ilmankosteuden pysyessä samana (Oda & Tsuji 1992). Tällöin VPD (Vapour pressure deficit) -arvo, eli vesihöyryn kyllästyspaineen vaje nousee. Ilma siis kuivuu, kun vedenmäärä ilmassa pysyy samana ja lämpötila nousee. Ilmankosteuden taas noustessa ja lämpötilan pysyessä samana, VPD-arvo laskee ja ilma kostuu (Peet 1999). Nämä tekijät vaikuttavat kasvin haihduttamiseen ja sitä kautta kasvuun ja ovat tärkeitä huomioida kasvihuoneen ilmastohallinnassa (Taiz & Zeiger 2006, Oda & Tsuji 1992).

Oda ja Tsuji (1992) tutkivat valon, ilman lämpötilan ja kosteuden sekä ilman vaihdon vaikutusta salaatin tuorepainoon. Valojen syttyessä päälle, salaatin haihdutus kiihtyi hetkellisesti johtaen nopeaan tuorepainon laskuun (Oda & Tsuji 1992). Kirjoittajat päättelivät tämän johtuneen huulisolujen aukeamisesta valon vaikutuksesta. Lämpötilan muuttuessa ja VPD-arvon pysyessä vakiona (0,6 kPa) ilmankosteutta säätelämällä, tuorepaino taas ei muuttunut. Kun taas VPD-arvo oli korkea, ilman kuivuessa, fotosynteesi heikkeni, tuorepaino laski, haihdutus kiihtyi ja lehden lämpötila laski. Ilmanvaihdon todettiin myös laskevan tuorepainoa, lämpötilan ja VPD-arvon pysyessä tasaisina. Kaikissa kokeissa tuorepaino palautui suurin piirtein samalle tasolle, kun käsittely oli lopetettu. Tutkijat päättelivät, että hetkelliset tuorepainon muutokset salaatilla ovat verrannollisia muutoksiin haihdutuksen tasossa. Pidemmällä aikavälillä tämä vaikuttaa myös kasvuun.

Tuorepainon kehityksen lisäksi haihdutukseen liittyy oleellisesti lehdenreunapolte, joka alentaa salaatin markkina-arvoa (Frantz & Ritchie 2004). Lehdenreunapolte johtuu kalsiumin puutteesta lehden reuna-alueilla ja on tyypillistä silloin, kun kasvu on niin nopeaa, ettei haihdutusvirtauksen mukana kulkeutuvaa kalsiumia riitä tarpeeksi nopeasti laajenevien solujen tarpeisiin (Clarkson 1984). Yleensä lehdenreunapoltetta esiintyykin voimakkaasti laajenevilla ja uloimmilla lehdillä. Toisaalta, lehdenreunapolte voi olla stressin aiheuttama oire, kuten Saure (1998) ehdottaa. Erityisesti nopeat muutokset valoisasta ja kuivasta ilmasta kosteaan ja pimeään ilmaan altistavat salaatin lehdenreunapolteelle. Saure spekuloiakin artikkelissaan monia tutkimuksia lehdenreunapolteesta ja ristiriitaisista tuloksista; joissakin tapauksessa kostea ilma, ja joissakin tapauksissa taas kuiva ilma, on aiheuttanut oireita, eikä useimmissa tapauksissa ole ollut kyse kalsiumin puutteesta. Yhtenä selityksenä voisi olla yleinen stressi, joka johtaa heikompiin solukalvoihin ja ionien vuotamiseen, häiriten kalsiumin kulkeutumista kasvien lehtien reunoille asti. Myös Tibbits ja Rao (1968) totesivat lehdenreunapoltetta esiintyneen sitä vähemmän, mitä vähemmän salaateilla oli ollut stressiä.

Yhteenvedona kuiva ilma päiväsaikaan lisää haihdutusta erityisesti uloimmilla, vanhimmilla lehdillä ja altistaa lehdenreunapolteelle (Frantz & Ritchie 2004). Liian kostea ilma taas vähentää haihdutusta, jolloin kalsiumia ei pääse virtamaan meristeemeihin tarpeeksi. Toisaalta, kuiva ilma yöllä vähentää kasvin turgoria, jolloin kalsiumia työntyy jälleen vähemmän lehdenpäihin. Tuuletus saattaa auttaa ehkäisemään lehdenreunapoltetta alentamalla VPD-arvoa uloimmilla lehdillä, parantaen haihdutusta (Shibata ym. 1995, Frantz & Ritchie 2004).

2.4 Pääasialliset lisävalonlähteet kasvihuonetuotannossa nyt ja tulevaisuudessa

2.4.1 Lämpöä säteilevät valaisimet

Lämpöä säteilevissä valaisimissa on hehkulanka ja valo syntyy kun lankaa kuumennetaan riittävästi sähköllä (Murdoch 1985). Lämpöä säteileviä valaisimia ovat hehku- ja halogeenivalaisimet, joiden spektrit ovat jatkuvia ja sisältävät runsaasti kaukopunaista valoa. Näiden valaisimien energiatehokkuus on erittäin huono, yli 90 %

valaisimen kuluttamasta energiasta muuntuu lämmöksi, eikä niitä käytetä kasvihuonetuotannossa varsinaisina valonlähteinä kasveille, joskin ne ovat edelleen käyttökelpoisia esimerkiksi edistämään pitkänpäiväkasvien kukintainduktiota tai salaattien itämistä (Borthwick 1952, Pinho 2008).

2.4.2 Kaasussa tai kaasuseoksessa tapahtuvan elektronipurkauksen avulla saatava valo

Sähköpurkauslamput sisältävät eri kaasuja eri paineissa, jotka emittoivat eri valon aallonpituuksia (Murdoch 1985). Valotehokkuus on näillä lampuilla huomattavasti parempi kuin hehku- ja halogeenivalaisimilla.

Fluoresoivissa lampuissa sähköpurkauksen yhteydessä virittyneiden kaasumolekyylien emittoima säteily käytetään suoraan valoksi (Murdoch 1985). Kaasumolekyylien emittoimalla säteilyllä viritetään lampun sisäpintaan sivellyn loisteaineen molekyylit, jotka palautuessaan virittyneestä tilasta emittoivat varsinaisen valon. Kasvintuotannossa käytettyjä valaisimia ovat loisteputkilamput ja eri maametalleista koostuvat suurpainevalaisimet. Loisteputkivalaisimet ovat käytössä lähinnä kasvatuskaapeissa tai vastaavissa olosuhteissa (Pinho 2008).

Kasvihuonetuotannossa on käytetty monimetalli- ja suurpainenatriumvalaisimia (High Pressure Sodium Lamp, HPS)(Pinho 2008). Eri metallien kaasu tuottaa höyrynpainetta nostettaessa spektriltään erilaista valoa, riippuen metallista tai niiden seoksesta (Murdoch 1985). Monimetallivalaisimet sopivat spektrinsä puolesta hyvin kasvintuotantoon, mutta niiden energiatehokkuus on vain noin 20%, joka on alhaisempi kuin käytetyimmillä HPS-valaisimilla (Pinho 2008). Lisäksi elohopeaa sisältävät lamput tullaan kieltämään EU:n sisällä lähivuosina.

Yleisin lisävalonlähde kasvihuonetuotannossa on HPS-valaisimet (Pinho 2008, Moe ym. 2006). Tyypillisimmin käytetään 400 ja 600 W:n lamppeja, joiden energiankäytöntehtokkuus on 30-40%, ollen myös tällä hetkellä tehokkain lisävalonlähde sähkönkulutuksen kannalta (Pinho 2008). HPS-valaisimien spektriä ei kuitenkaan pidetä parhaimpana mahdollisena kasvintuotantoon (Tazawa, 1999). Vain noin 40% HPS-lamppujen fotoneista sijoittuvat PAR-valon alueelle (Tazawa 1999, Pinho 2008). Sen spektri sisältää 51% keltaista valoa, 40% punaista valoa ja 9% sinistä

valoa. Keltaisen valon alueelle sijoittuu myös korkein emissiopiikki (569 nm). Fotosynteesin kannalta tärkeimmät valon värialueet ovat sininen ja punainen valo, missä klorofyllin absorptiopiikit sijaitsevat (Taiz & Zeiger 2006). Lisäksi UV- ja kaukopunaista valoa on vain hyvin vähän HPS-lamppujen spektrissä. (Tazawa 1999, Pinho 2008). Siksi HPS- valaisimien punaisen ja kaukopunaisten valon suhde ylittää kasveille optimaalisen R:FR- suhteen.

HPS-valaisimet myös tuottavat huomattavasti lämpöä; noin 60-70% kokonaisenergiankulutuksesta kuluu lämmöntuotantoon (Pinho 2008). Energiankulutuksen lisäksi epäedullisena voidaan pitää sitä, että lamput täytyy asettaa suhteellisen kauaksi kasveista. Tämä vaikeuttaa lamppujen käyttöä muun muassa välivalotuksessa (van Ieperen & Trouwborst, 2008). Lisäksi, niiden tekniikka on siinä määrin rajoittunutta, että niiden energiatehokkuutta tuskin saadaan parannettua tulevaisuudessakaan ja polttimoiden käyttöikä on myös suhteellisen lyhyt (van Ieperen & Trouwborst, 2008, Pinho 2008)

2.4.2 Puolijohde-, eli LED-valaisimet

LED-valaisimissa on kaksinapainen elektroniputki, jossa elektronit kulkevat navalta toiselle tyhjiössä samalla valoa lähettäen. Diodilampuilla on mahdollista saada aikaan monokromaattista valoa ja niitä yhdistelemällä tarkalleen halutunlaisen spektrin. Nykyään on myös niin sanottuja kirkasvalo LED-polttimoita, jotka emittoivat näkyvän valon aallonpituuksia punaisesta vihreään valoon (Pinho 2008). Näiden energiatehokkuus on tällä hetkellä noin 20%, mutta teoreettinen energiatehokkuus on arviolta jopa 100% (Pinho 2008). Kasvintuotannossa LED-valaisimia käytetään tällä hetkellä lähinnä kasvatuskaapeissa (Folta & Kayla 2008, Massa ym. 2008). Myös muutamia LED-valojen varassa olevia ”kasvitehtaita” on jo esimerkiksi Japanissa (Ono & Watanabe 2006).

LED-valaisimen etuna on spektrin optimoiminen halutunlaiseksi kunkin kasvin ja sadon määrää sekä laatuavoitteiden mukaan, eikä energiaa tarvitse tuhjata ”turhiin” aallonpituuksiin (Pinho 2008, Morrow 2008). LED-valaisimia voidaan lisäksi sytyttää ja sammuttaa lampun siitä kärsimättä, toisin kuin HPS- valaisimia (Pinho 2008). Niiden käyttöikä on huomattavasti pidempi kuin muilla valaisimilla. LED-polttimot eivät

säteile lämpöä, jolloin ne voidaan sijoittaa lähellekin kasveja, eivätkä ne sisällä elohopeaa (Morrow 2008).

Toistaiseksi LED-valaisimien sähkönkäytön tehokkuus on lähes samaa luokkaa kuin HPS-valaisimilla, mutta niiden tekniikka on kehitettävissä huomattavasti energiatehokkaammaksi (Pinho 2008, Morrow 2008). LED-valaisimet tuottavat enemmän lämpöä wattia kohden kuin HPS-valaisimet, mutta lämmöntuotto ei kohdistu säteilyyn, joka mahdollistaa LED-valojen asettamisen lähelle kasvustoa, esimerkiksi välivalotuksessa (Massa ym. 2008). Lämmöntuotto kohdistuu LED-valaisimilla muuntajiin ja jo nyt on olemassa tekniikkaa, jolla tämä lämpö voidaan ottaa talteen ja hyödyntää se kasvien kannalta järkevämmiin. (van Ieperen & Trouwborst, 2008). Tekniikan kehityttyä energiatehokkaammaksi ja kasvien valobiologian tietämyksen lisääntyessä, voidaan LED-valojen uskoa tulevaisuudessa syrjäyttävän HPS-valaisimet kasvihuonetuotannossa (Folta & Kayla 2008, Massa 2008, Morrow 2008, Pinho 2008).

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tämä tutkimus oli osa SSH Lightning-projektia (Solid-state horticultural lightning system, puolijohdevalaistusjärjestelmä kasvihuoneviljelyyn), Aalto Yliopiston valaistusyksikön ja Helsingin yliopiston maataloustieteiden laitoksen yhteistyöhanketta, jossa tavoitteena oli kehittää ympärivuotiseen kasvihuonetuotantoon sopivaa LED-valaistusta. Tavoitteena oli tutkia LED-valojen tekniikan tarjoamia mahdollisuuksia lisävalon lähteinä ruukkusalaatin kasvihuonetuotannossa luonnonvalon rinnalla, vähentää sähkönkulutusta sekä parantaa ruukkusalaatin tuottavuutta ja ulkoista laatua.

Aalto yliopisto suunnitteli ja rakensi LED-valaisimet Otaniemen valaistuslaboratoriossa ja kasvatuskokeet ja laboratorioanalyysit tehtiin Viikissä maataloustieteiden laitoksen tiloissa. Valaisimien lisäksi valaistuslaboratorio kehitti DLC-sensorin (Dynamic lighting control), joka huomioi portaattomasti vallitsevan luonnonvalon määrän ja antaa lisävaloa vain tarvittavan määrän asetetun raja-arvon mukaisesti. Tämän tavoitteena oli sähkönkulutuksen säästäminen. Projektin ensimmäisissä kasvukokeissa kevättalvella 2010 testattiin viittä eri valon aallonpituutta ja niiden vaikutusta salaatin kasvuun ja sisäiseen laatuun (Pinho ym. 2010). Tämän vaiheen perusteella valittiin jatkokokeisiin lämminvalkoinen LED-valaisin. Kakkosvaiheessa, eli omassa osuudessani, keskityttiin

salaatin kasvun seurantaan ja lehdenreunapolteen esiintymiseen eri lamppujen välillä sekä DLC-sensorin testaamiseen ja sähkönkulutuksen seurantaan. Tavoitteena oli myös selvittää valokäsittelyn vaikutus punaisen värin muodostumiseen tammenlehtisalaatilla. Lisäksi mitattiin valaisimen vaikutusta salaattikasvuston ilman lämpötilaan, suhteelliseen ilman kosteuteen ja lehdenpinnan lämpötilaan.

Hypoteesit:

- 1) Salaatin kasvu ei eroa HPS- ja LED-valaisimien välillä (valon laatu)
- 2) LED-valaisin kuluttaa vähemmän sähköä kuin HPS-valaisin
- 3) DLC-sensorilla varustetulla LED-valaisimella saadaan tuotettua energiatehokkaammin satoa (g/kWh)
- 4) LED- ja HPS-valaisimien alla on erilaiset mikroilmastot ja se vaikuttaa kasvuun ja lehdenreunapolteen esiintymiseen

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1 Kasvimateriaali

Tässä tutkimuksessa toteutettiin kaksi eri koetta, joissa selvitettiin lämminvalkoisen LED-valaisimen soveltuvuutta jääsalaatin ja tammenlehtisalaatin lisävalon lähteenä kasvihuoneviljelyssä. Kokeet toteutettiin Helsingin Yliopiston Viikin kampuksen kasvihuoneilla (60°13'30" N, 25°2'0" E) syys-joulukuussa 2010.

Ensimmäisen kokeen jääsalaatin (*Lactuca sativa* L. 'Frislice') siemenet oli tilattu jo esikokeita varten tammikuussa 2010 (Helle Oy, Helsinki, Suomi). Pilleröidyt siemenet kylvettiin 14.9.2010 suoraan ruukkusalaatti-ruukkuihin. Kasvualustana käytettiin Kekkilän peruslannoitettua ja kalkittua vaaleaa rahkaturvetta. Jokaiseen ruukkuun kylvettiin kolme siementä ja ne peitettiin kevyesti. Idätys tapahtui HPS-lamppujen alla (18 h valojakso) kasvihuoneessa. Salaatin taimet siirrettiin koalueelle 20.9.2010. Lannoitus aloitettiin 24.9.2010. Jokaiseen ruukkuun jätettiin kaksi taimea ja ruukut asetettiin sattumanvaraisessa järjestyksessä eri käsittelyihin. Ensimmäinen koe lopetettiin 28.10.2010. Koe kesti siis 39 päivää.

Toisen kokeen tammenlehtisalaatin (*Lactuca sativa* L. 'Rouxai') taimet tulivat Wääksyn kartanon salaattiviljelmiltä (Wääksyn kartano, Kangasala, Suomi), sillä omat kylvöt epäonnistuivat. Siemenet oli kylvetty 25.10. idätyshuoneessa, jonka jälkeen ne kasvoivat HPS-lampun alla 20 tunnin valojaksolla. Taimet laitettiin käsittelyjen alle Viikissä 5.11.2010. Ruukut ja kasvualusta olivat samat kuin edellisessä kokeessa ja kuhunkin ruukkuun jätettiin kaksi taimea kasvamaan. Toinen koe lopetettiin 7.12.2010, eli 34 päivän kuluttua valokäsittelyjen alkamisesta

4.2 Valaisimet

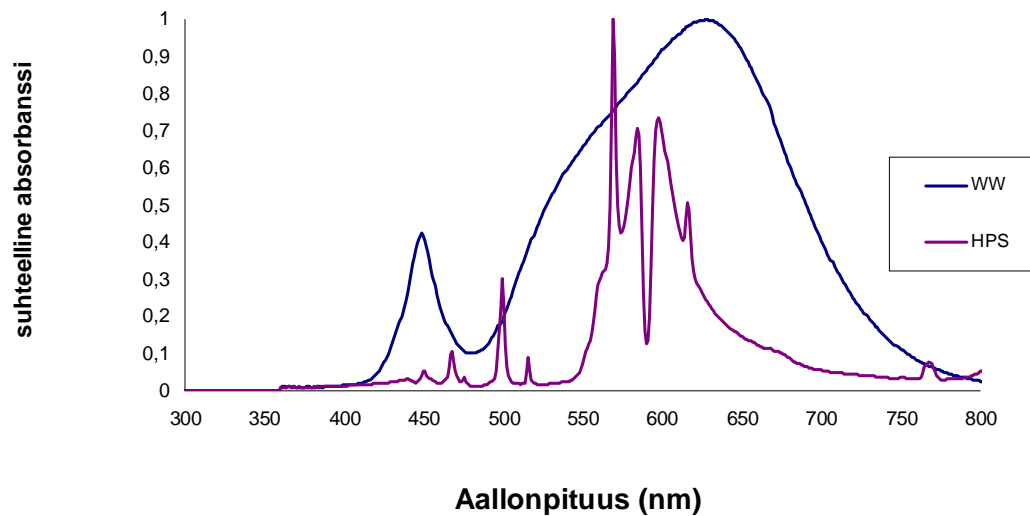
4.2.1 LED- valojen ja DLC- sensorin tekninen toteutus

LED-valaisimet ja DLC-sensori suunniteltiin ja rakennettiin Aalto Yliopiston valaistusyksikön tiloissa Otaniemessä. LED-valaisimet koostuivat kuudesta eri kiskosta, joihin oli asetettu yhteensä 36 lämminvalkoisia LED-modulia (13 W Light-Line Source L-CM12/L-CM6, värisävy 2700 K, Citizen Electronics Co. Ltd. Japan). Sähkönkulutusta mitattiin kustakin lampusta tiedontallennusyksiköllä (MX100, Yokogawa, Japan) ja kunkin lampun valojaksoa säädeltiin kasvihuoneen automatiikkajärjestelmän (Integro, Priva, Hollanti) kautta.

DLC:tä varten oli LED-valaisimen päälle sijoitettu PAR-valosensori (LI-190SA, LICOR, USA), jonka mukaan DLC oli ohjelmoitu. Lamppu sammui kokonaan, kun sensoriin osunut luonnonvalo ylitti $180 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, jolloin kasvustossa oli $150 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Mikäli luonnonvaloa oli vähemmän tarjolla, DLC-sensori antoi vain sen verran lisävaloa, että minimi-valotaso $150 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ saavutettiin kasvustossa.

4.2.2 Valon laatu ja intensiteetti

Esikokeiden perusteella tähän kokeeseen valittiin lämminvalkoinen LED-valaisin. Kontrollivalaisimena käytettiin kahta, käyttämätöntä 400 W suurpainenaatriumvalaisinta (Plantastar, Osram, Saksa). HPS-lampun spektrissä on hieman vähemmän sinistä ja punaista valoa ja hieman enemmän vihreätä valoa kuin LED-valaisimessa (Kuva 1, Taulukko 1)(Pinho 2010, henkilökohtainen tiedonanto).



Kuva 1. Kokeessa käytettyjen HPS- ja lämminvalkoisen LED-valaisimien (WW) spektrit mitattuna suhteellisena fotonien absorbanssina.

Kunkin lampun spektri tarkistettiin molempien kokeiden alussa ja lopussa. Lisäksi DLC-lampun alla mitattiin jatkuvasti spektriä spektrometrillä (HR4000, Ocean Optics, USA) kokeiden aikana.

Taulukko 1. PAR- valon osuuksien jakautuminen HPS- ja lämminvalkoisilla LED-valaisimilla (WW) ja punaisen ja kaukopunaisen (700-800nm) valon suhteet sekä kaukopunaisen ja UV-valon (250-400nm) osuus PAR-säteilystä.

	WW	HPS
PAR(%)		
sininen (400-500nm)	7	5
vihreä (500-600nm)	37	47
punainen (600-700nm)	56	48
R/FR	4,9	4,3
FR (%)	10,4	9,8
UV (%)	0,2	0,5

Ensimmäisen kokeen aikana kummankin LED-valaisimen (LED ja LED + DCL) korkeus kourusta lampun alareunaan oli 120,5 cm. HPS-lampun vastaava korkeus oli 125 cm ja polttimoiden etäisyys toisistaan oli 50 cm. Kokeen 2 alussa huomattiin DLC-valaisimen intensiteettitason jostain syystä laskeneen (noin 5%), jonka takia lamppua jouduttiin laskemaan 10 cm.

Kunkin kokeen alussa ja lopussa määritettiin jokaisen koealueen intensiteetit. Mittaamiseen käytettiin neliömetrin (100 cm x 100 cm) kokoista levyä, johon oli merkattu 17 x 17 mittauspistettä, josta kustakin mitattiin kalibroidulla PAR-valosensorilla (LI-190SA, LI-COR, USA) intensiteetti. Koealue oli 100 cm x 71 cm, jolle laskettiin intensiteetin keskiarvo (17 x 12 mittauspistettä) mittausten perusteella. Lamppujen korkeus määritettiin niin, että jokaisen koealueen keski-intensiteetti oli 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ korkeintaan 5% virheellä (Taulukko 2).

Taulukko 2. Keskimääräiset valon intensiteetit ja keskihajonnat kummankin kokeen alussa ja lopussa. Arvot ovat keskiarvoja (204 mittauspistettä) kunkin lampun alta sekä kokeen aikana tapahtuneet muutokset prosentteina.

	HPS	DCL	LED
koe 1 alussa	157 \pm 12	151 \pm 14	152 \pm 11
koe 1 lopussa	159 \pm 10	145 \pm 14	151 \pm 11
muutos (%)	1 %	-4 %	-1 %
koe 2 alussa	159 \pm 10	153 \pm 16	151 \pm 11
koe 2 lopussa	152 \pm 11	150 \pm 16	147 \pm 12
muutos (%)	-4 %	-2 %	-3 %



Kuva 2. Vasemmalla LED-valaisin ja oikealla HPS-valaisin.

4.2.3 Datan taltiointi ja valojärjestelmän ohjaus

Kaikkia valaisimia ohjattiin kasvihuoneautomatiikka-järjestelmä avulla (Integro, Priva, Hollanti). Valojakso ohjelmoitiin kaikille valaisimille 20 tunniksi. HPS- ja LED-valaisimelle asetettiin raja-arvot, joiden ylittyessä ne sammuiivat aurinkoisena päivänä, kuten kasvihuoneviljelijöillä on tapana tehdä (Muurman 2010, suullinen tiedonanto). Raja-arvo asetettiin kokeellisesti niin, että lamput sammuiivat, kun kasvustossa ylittyi $300 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ intensiteettitaso. Tällöin lamppujen sammuesssa valotaso tippui $150\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ tasolle, kuten DLC-valaisimella. Sammuttuaan kontrollivalaisimet olivat poissa päältä ainakin 10 min., sillä HPS-valaisimen polttimot eivät kestä jatkuvaa sytyttelyä.

Jokaisen lampun alle, koealueen keskelle, oli laitettu PAR-anturi (LI-190SA, LI-COR, USA), joiden tarkoituksena oli mitata intensiteetin vaihtelua kunkin lampun alla. Kasvihuoneautomatiikka-järjestelmään tallentui 5 minuutin välein kustakin anturista mittaustulos valon intensiteetistä sillä hetkellä. Lisäksi DLC-valaisimen päällä oli vielä toinen anturi, joka mittasi luonnonvaloa kasvihuoneen sisällä (Kuva 2).

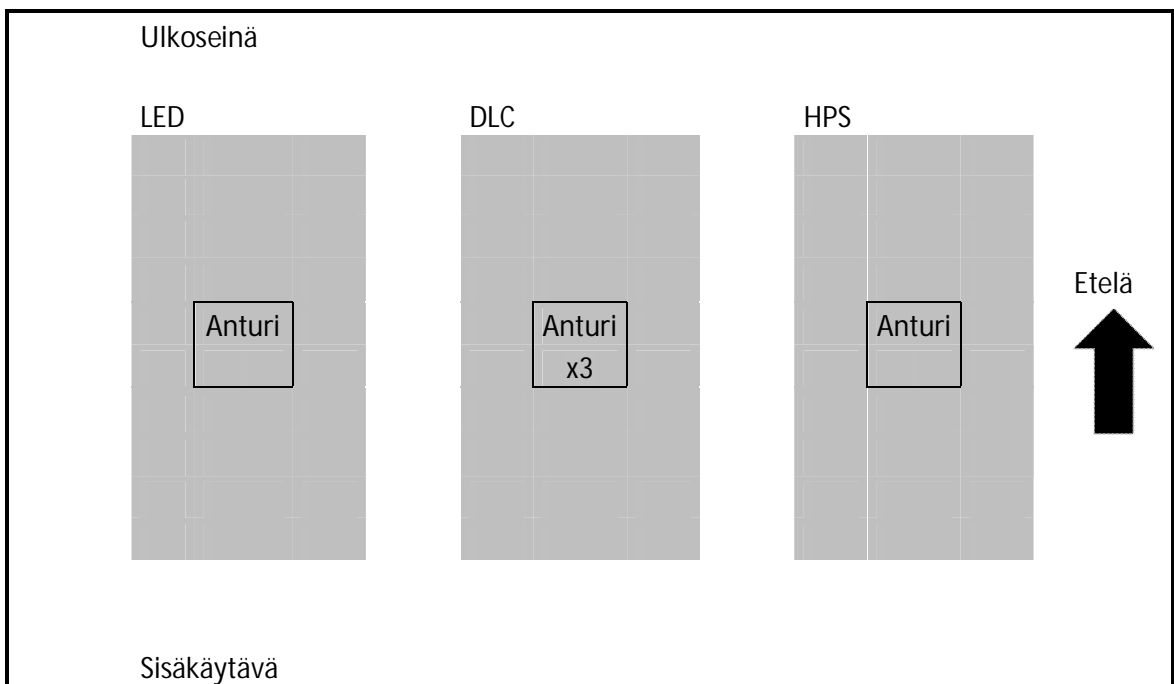
Kussakin anturissa oli jonkin verran mittausvirhettä verrattaessa kalibroituun PAR-anturiin. Virhemarginaali määritettiin vertaamalla kalibroitua anturia samaan aikaan kasvihuoneautomatiikan antamaan lukemaan. Nämä virhekertoimet huomioitiin lopullisissa säteilysumma laskuissa (Taulukko 3). Anturi numero 5 oli ensimmäisessä kokeessa DLC-sensorin vieressä valaisimen päällä, keräämässä dataa kasvihuoneeseen sisään tulevasta luonnonvalosta ja valo-olosuhteista, mitkä ohjailivat DLC-sensorin toimintaa. Toisen kokeen ajaksi ensimmäisen kokeen DLC-sensori ja sensori 5 vaihtoivat paikkoja keskenään.

Taulukko 3. DLC-, LED- ja HPS-lamppujen alla olleiden PAR-sensorien virhemarginaalit määritettyinä kalibroidulla PAR-sensorilla, jota verrattiin samanaikaisesti kasvihuoneautomatiikkaohjelman antamaan lukemaan. Lopullisissa säteilysummalaskuissa huomioitiin virhemarginaali.

Sensori	Priva ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Licor ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	%	Kerroin
DLC	191,9	177,4	8	0,92
LED	166,9	163,8	2	0,98
HPS	173,9	173,5	0,3	0,997
5	179,9	178,6	0,3	0,997

4.3. Koejärjestelyt

Koehuoneeseen oli varattu kolme kasvatuspöytää asetettuina pohjois- eteläsuuntaan (Kuva 3). Kullakin pöydällä oli kahdeksan ruukkusalaatin tarkoitettua kasvatuskourua koko pöytien matkan pituudelta. Kourut olivat 15 cm päässä toisistaan ja reikien väli kourussa oli 11 cm. Koealueena toimivat kussakin käsittelyssä neljä sisimmäistä kourua pöytien keskellä. Kussakin oli kuusi reikää koekasvien ruukuille. Koekasvien ympärillä oli suojakasvit. Pöytien välille oli ripustettu valkoiset muovit pitämään valokäsittelyt erillään toisistaan



Kuva 3. Kaaviokuva koejärjestelystä. Vaaleanharmaat alueet kuvaavat kasvatuspöytiä, joiden sisällä olevat neliöt koealueita antureineen. Kaksi DLC-lampun antureista oli sijoitettu lampun päälle, loput anturit olivat kunkin valaisimen koealueen keskellä, kasvuston tasolla. Väliseinien edessä ja käsittelyjen välissä oli valkoiset muovit.

4.3.1 Kastelu ja lannoitus

Jokaisen pöydän kastelusta huolehti 180l säiliöllä varustettu kasteluyksikkö, joka kierrätti hitaasti vettä jatkuvasti kourujen läpi. Ensimmäisen kokeen alussa varmistettiin, että veden virtausnopeus oli sama kunkin käsittelyn ja jokaisen kourun osalta. Ylimääräiset kourujen reiät peitettiin valkoisella muovilla veden haihtumisen estämiseksi.

Ravinneliuosta varten tehtiin seos Kekkilän Vihannes SuperEx- peruslannoitteesta (NPK 9-5-31, Kekkila Oy, Suomi) ja Yaran Calcinit typpikalsiumlannoitteesta (15,5% N, 19% Ca, Yara, USA). Kunkin kokeen alussa punnittiin lannoitteet määrättyissä suhteissa toisiinsa nähden (Vihannes SuperEx:2xCalcinit) ja sekoitettiin keskenään isompi erä, jota käytettiin koko kokeen ajan. Lannoiteseoksen N:K-suhde oli 1:1,2. Lannoiteseos lisättiin salaateille seuraavana päivänä kokeen alkamisesta.

Johtoluvun oli tarkoitus olla kokeen aikana 1,6-1,8 ms ja pH 5,5-6,0. Vesiärvot, vedenkulutus ja vedenlämpötila tarkistettiin kummankin kokeen aikana kolme kertaa viikossa. Lannoitetta lisättiin tarvittaessa niin, että johtoluku asettui halutulle tasolle vedenlisäyksen jälkeen, mutta pH-lukua ei säädelty erikseen. Vedet vaihdettiin kuitenkin kerran kummankin kokeen aikana, jotta pH-arvo ei nousisi liikaa. Liitteenä vesiärvöjen mittaustulokset kummastakin kokeesta (Liitteet 1 ja 2).

4.3.2 Kasvuolosuhteet

Koehuoneen lämpötilaa säädeltiin Priva -kasvihuoneautomaatiikalla. Yölämmöksi asetettiin 16,5 °C, päivälämmöksi 17,5 °C ja tuuletuslämmöksi 18,5 °C. Suhteellista ilmankosteutta ei säädetty erikseen eikä hiilidioksidilannoitusta ollut käytössä.

4.4 Mittaukset ja havainnointi

4.4.1 Kasvun mittaus

Molempien kokeiden lopussa määritettiin salaattien korkeus, lehtien lukumäärä ja tuore- sekä kuivapaino. Kasvumittauksiin käytettiin kustakin käsittelystä 16 salaattia. Salaattien korkeus ruukun yläreunasta ylimpään lehteen mitattiin viivoittimella. Ruukunpäällisten osien tuorepaino määritettiin digitaali-vaakalla, jonka jälkeen laskettiin täysin kehittyneet lehdet.

Salaatit laitettiin 1,5 litran paperipusseissa uuniin kolmeksi päiväksi 60 °C:een, jonka jälkeen määritettiin kuiva-painot. Ensimmäisen kokeen salaatit punnittiin paperipussien kanssa; vaaka taarattiin 10 pussin painon keskiarvolla, jotka olivat olleet uunissa saman

ajan. Toisen kokeen kasvit punnittiin ilman pusseja, sillä näytteet olivat pussien painoon nähden kevyitä.

4.4.2 Lehdenreunapoltteen arviointi

Lehdenreunapoltteen esiintyminen arvioitiin silmämääräisesti Kauppapuutarhaliiton ruukkuvihannesjaoston ohjeiden mukaisesti (Kauppapuutarhaliitto ry, ruukkuvihannesjaosto 2009) asteikolla 1-3, missä kolmonen edusti myyntiin kelpaamatonta salaattia (Liite 3.) Arviointi tehtiin kummankin kokeen lopetuksen yhteydessä samoista kasveista, jotka käytettiin kasvumittauksiin.

4.4.3 Lämpötilamittaukset

Kasvihuoneautomaatiikkaohjelma tallensi kummankin kokeen ajalta koehuoneessa vallinneet lämpötilat ja suhteellisen ilmankosteudet. Tensiometri oli DLC-käsittelyn pöydän päässä, eli koko koehuoneen keskellä.

Kuhunkin kasvustoon asetettiin lisäksi kaksi dataloggeria (Tinytag Data Logger Ultra, Gemini Data Loggers Ltd. UK), jotka mittasivat viiden minuutin välein kasvuston ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta.

Lehdenpinnan lämpötilat mitattiin kahdella eri infrapunakameralla, yhteensä kolme kertaa ensimmäisen, ja kaksi kertaa toisen kokeen aikana. Ensimmäisen kokeen aikana mittaus suoritettiin Flir-infrapunakameralla (InfraCAM Wester, Flir, USA) 13.10 ja toinen mittaus 26.10.2010. Mittaukseen valittiin 12 koekasvia kustakin käsittelystä. Salaatit kuvattiin kokonaan ylhäältäpäin. Mittauspisteitä oli 14 400 jokaisesta salaatista ja keskiarvoja laskettaessa poistettiin kaikki yli 18 °C olevat arvot. Kuvissa näkyi muutakin kuin salaattia, esimerkiksi kasvihuoneen betonilattiaa. Muun kuin kasvimateriaalin lämpötila asettui kuvissa suuremmaksi kuin 18 °C, mutta salaatin lehdistä ei löytynyt 18 °C ylittäviä arvoja. Liitteenä esimerkkejä (Liite 4). Lisäksi 27.10.2012 mitattiin vielä kaikki koekasvit Fluke-infrapunakameralla (Tir27, Fluke, USA).

Toisen kokeen aikana lehdenlämpötilat mitattiin vain Fluke-infrapunakameralla. Mittaukset tehtiin 27.11.2010 ja 2.12.2010 kaikista koekasveista. Mittausmetodina oli keskiarvomittaus, eli kamera mittasi lämpösäteilyä tietyltä alalta tietyn ajan ja laski siitä keskiarvon. Kaikki lehdenlämpötilamittaukset tehtiin aamuisin, ennen auringon nousua.

Valaisimen vaikutusta salaattien haihdutukseen vertailtiin laskemalla vesihöyryn kyllästyspaineen vaje (VPD, Vapour pressure deficit) kasvustossa. VPD-arvot kasvin lehden pinnan ja ilman välillä laskettiin seuraavanlaisesti (Agata ym. 1986, Zolnier ym. 2000);

$$VPD_{\text{kasvi-ilma}} = \rho_{ws}(t_{\text{kasvi}}) - \phi \rho_{ws}(t_{\text{ilma}})$$

ρ = ilman tiheys kg m^{-3}

t = lämpötila $^{\circ}\text{C}$

ϕ = suhteellinen ilmankosteus (desimaalina)

$\rho_{ws}(t_{\text{kasvi}})$ = lehden lämpötilan mukaan laskettu kylläisen vesihöyryn paine

$\rho_{ws}(t_{\text{ilma}})$ = ilman lämpötilan mukaan laskettu kylläisen vesihöyryn paine

Kasvien lehden sisäinen ilmankosteus oletetaan olevan 100%, eli kerroin on 1.

Kylläisen höyrynpaineen voi laskea seuraavanlaisesti (Berry ym. 1945)

$$\rho_{ws}(t) = 610,78 * 10^{(7,5t / (237,3 + t))}$$

4.4.4 Antosyaanien määrittäminen

Toisen kokeen punalehtisestä tammenlehtisalaatista määritettiin antosyaanit. Jokaisessa ruukussa kasvoi kokeen aikana kaksi taimea. Näistä toinen käytettiin antosyaanianalyysiin. Kokonaisantosyaanipitoisuuksien määrittämiseksi otettiin jokaisesta käsittelystä kaksi koekasvia kustakin kourusta (kahdeksan näytettä/käsittely). Näytteet otettiin 27.11 ja ne säilöttiin nestetyppeen sekä siirrettiin odottamaan pakkaskuivausta -70° C:een. Pakkaskuivaus suoritettiin viikolla 50. Pakkaskuivatut näytteet jauhettiin 10.1.2011 kuulamyyllyllä 25ml kapsleissa (28 r/s, 48s.). Uuttoa varten punnittiin mahdollisimman tarkasti 10 mg jauhettua salaattia 2 ml Eppendorf-putkiin. Kustakin näytteestä tehtiin kolme toistoa.

Uuttoliuosta valmistettiin metanolista, kuten Mancinelli ja Rabino (1975). Kerralla tehtiin 200 ml:n erä, jossa oli 4,15 ml 12 M suolahappoa, 140 ml metanolia ja loput MQ-vettä. Uuttoliuosta lisättiin 1 ml kuhunkin näyteputkeen samanaikaisesti ja sekoitettiin 5 sekuntia koeputkisekoittajalla. Näytteet uuttuivat jääkaapissa (+4 °C) 43 tuntia ennen absorbanssien mittaamista 530 nm (antosyanidien absorbtiomaksimi) ja 657 nm (klorofyllin absorbtiomaksimi) aallonpituuksilla. Ennen mittausta näytteet sentrifugoitiin (5 min./11 x 1000 rpm), jonka jälkeen absorbanssit mitattiin mahdollisimman nopeasti Agilent 8453- spektrofotometrillä. Mittauksessa käytettiin kvartsikyvettä, johon laitettiin 500 µml supernatanttia. Spektrofotometri nollattiin uuttoliuksella yhdeksän mittauksen välein ja näytteet pidettiin jäällä koko mittauksen ajan. Antosyaanipitoisuuden määrittämiseen käytettiin kaavaa $A_{530} - (0,33 \times A_{657})$, jotta saadaan poistettua 530nm absorbanssin kohdalla näkyvien klorofyllin ja sen happamassa liuoksessa syntyvien hajoamistuotteiden osuudet (Mancinelli & Rabino 1975).

4.5 Tilastolliset analyysit

Tilastoanalyysi suoritettiin yksisuuntaisena varianssianalyysina (GLM Procedure, SAS 9.2, USA). Kukin valaisin oli käsittelynä ja vertailtavina arvoina olivat tuorepaino, kuivapaino, lehtien lukumäärä, salaattien korkeus ja tammenlehtisalaatilla antosyaanipitoisuus. Koeaineiston normalisuus testattiin Levenen testillä ja keskiarvojen eroja vertailtiin Tukey:n testillä. Tilastollisesti merkitsevän tuloksen raja oli $p < 0,05$.

5 TULOKSET

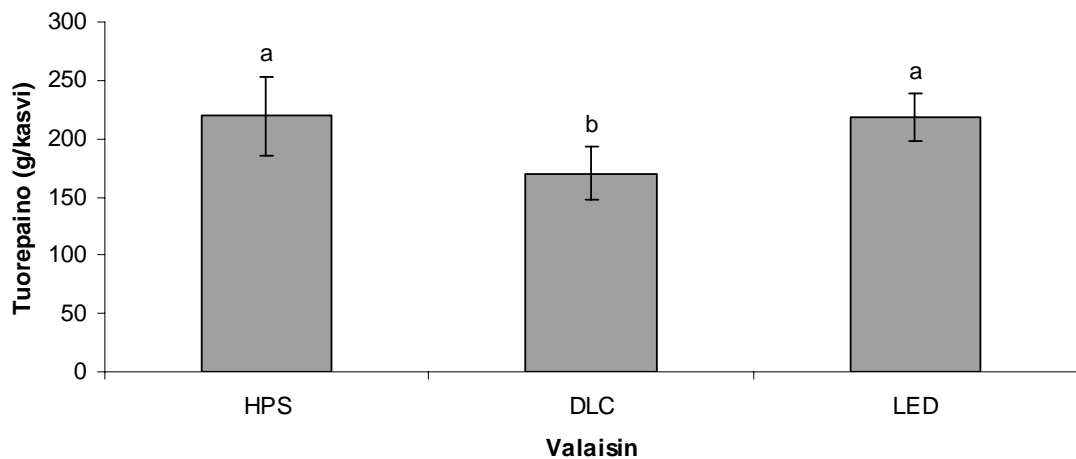
5.1. Kasvu

5.1.1 Tuorepaino

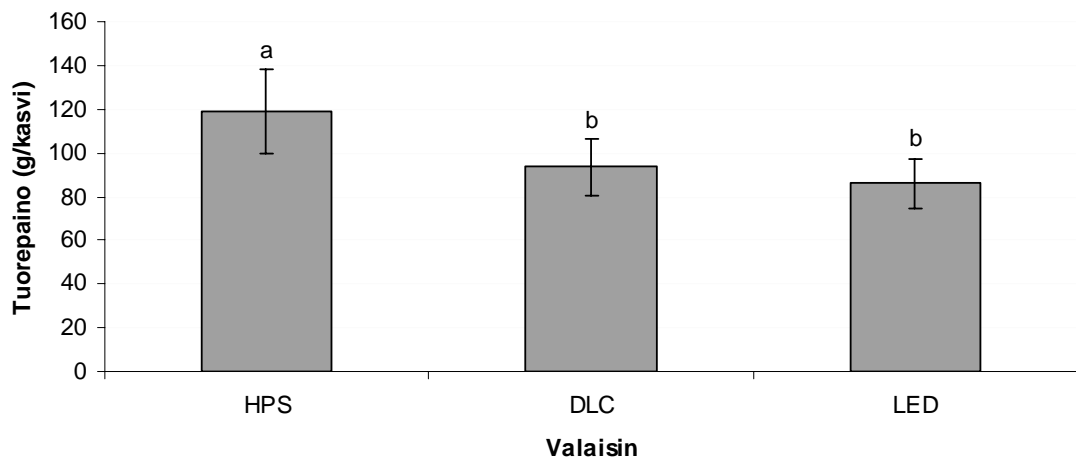
Kokeen tavoitteena oli vertailla ruukkusalaattien kasvua LED-, DLC- ja HPS-valokäsittelyjen välillä. Kauppapuutarhaliiton laatuohjeiden mukaan kauppakelpoisen jääsalaatin vähimmäistuorepaino on 100 g ja tammenlehtisalaatin 115 g. Jääsalaattien tuorepainojen erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä LED- ja HPS-käsittelyn saaneilla salaateilla (Kuva 5). DLC-käsittelyn salaattien tuorepaino oli noin 28% pienempi verrattuna HPS- ja LED-käsittelyn salaatteihin ($p<0,001$) Kaikki salaatit ylittivät kuitenkin selvästi 100 g kauppakelpoisuusrajan.

Valokäsittelyt vaikuttivat myös tammenlehtisalaatin tuorepainoon ($p<0,001$). Keskimääräinen tuorepaino oli noin 38% pienempi LED-käsittelyn saaneilla salaateilla ja 27% pienempi DLC-käsittelyn saaneilla salaateilla verrattuna HPS-valaisimen alla kasvaneisiin salaatteihin (Kuva 5). DLC-käsittelyn salaatit olivat noin 9% painavampia kuin LED-käsittelyn salaatit, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Tammenlehtisalaatin kauppakelpoisuusraja on 115 g. Tämä ylittyi 50%:lla HPS-käsittelyn saaneista salaateista. DLC-valon alla kasvaneista salaateista vain yksi koejäsen painoi yli 115 g ja LED-valon alla kasvaneet salaatit olivat kaikki alle 115 g:n painoisia.

A



B

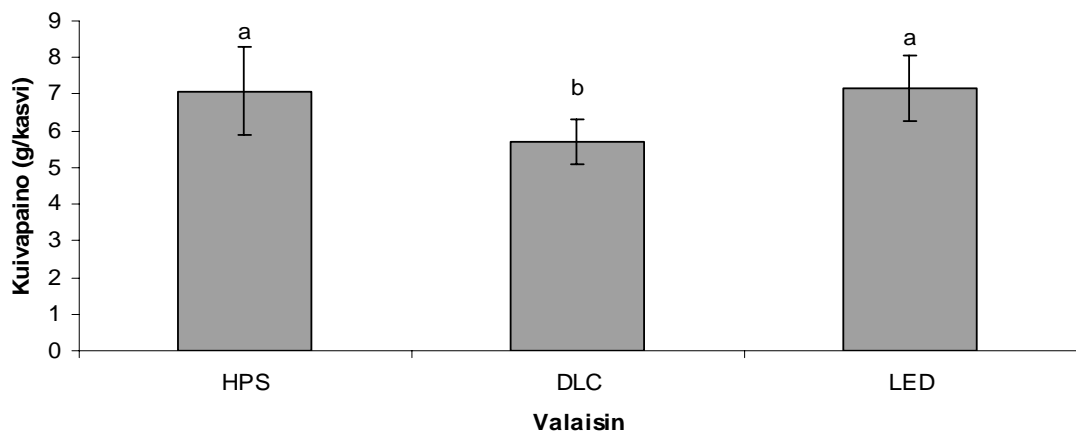


Kuva 5. Jääsalaatin (A) ja tammenlehtisalaatin (B) tuorepaino kokeen 2 lopussa LED-, DLC- ja HPS valaisimien alla. Arvot ovat 16 koejäsenen keskiarvoja ja pystyjanat kuvaavat keskihajontaa. Samalla kirjaimella merkityt eivät eroa toisistaan tilastollisesti merkitsevästi ($p > 0,05$).

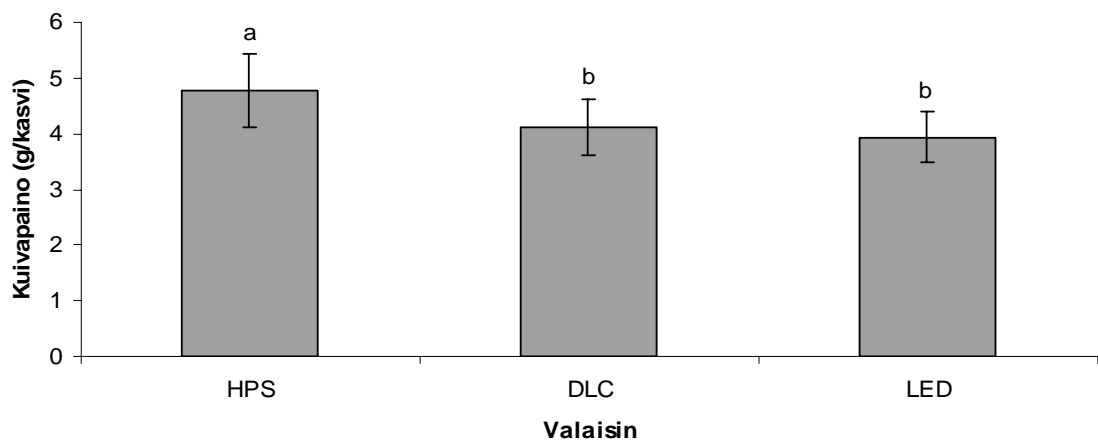
5.1.2 Kuivapaino

Tuorepainon lisäksi määritettiin myös salaattien kuivapainot kummastakin kokeesta. Jääsalaatilla HPS- ja LED-käsittelyjen salaattien kuivapainot eivät tilastollisesti merkitsevästi eronneet toisistaan (Kuva 6). DLC-käsittelyn salaateilla kuivapaino jäi pienemmäksi verrattuna HPS- ja LED-käsittelyn saaneisiin salaatteihin ($p = 0,0001$). Kuiva-ainepitoisuuksissa (kuivapaino/tuorepaino) ei ollut juurikaan eroja käsittelyjen välillä; HPS-käsittelyn salaateilla se oli 3,2%, LED-käsittelyn salaateilla 3,3% ja DLC-käsittelyn salaateilla 3,4%.

A



B



Kuva 6. Jääsalaatin (A) ja tammenlehtisalaatin (B) kuivapaino kokeen 2 lopussa LED-, DLC- ja HPS-valaisimien alla. Arvot ovat 16 koejäsenen keskiarvoja ja pystyjanat kuvaavat keskihajontaa. Samalla kirjaimella merkityt eivät eroa toisistaan tilastollisesti merkitsevästi ($p > 0,05$).

HPS-lampun alla kasvaneilla tammenlehtisalaateilla oli korkein kuivapaino; 21% korkeampi kuin LED-käsitellyillä salaateilla ja 16% korkeampi kuin DLC-käsitellyillä salaateilla ($p=0,0002$) (Kuva 6). DLC- ja LED-valaisimien alla kasvaneiden salaattien kuivapainojen erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Kuiva-ainepitoisuus taas tässä kokeessa oli korkein LED-käsittelyn salaateilla (4,6%), toiseksi korkein DLC-käsittelyn salaateilla (4,4%) ja matalin HPS-käsittelyn salaateilla (4,0%).

5.1.3 Lehtien lukumäärä

Kasvua mitattiin myös vertailemalla eri käsittelyjen vaikutusta salaattien lehtien lukumäärään. Jääsalaatin lehtien lukumäärän keskiarvo oli HPS- ja LED-käsittelyjen salaateilla yhtäsuuri (Taulukko 4). DLC-käsittelyn saaneilla salaateilla lehtien lukumäärä jäi alhaisimmaksi, mutta ero oli tilastollisesti merkitsevä vain verrattuna HPS-valon alla kasvaneisiin salaatteihin ($p=0,002$). Tammenlehtisalaattien lehtien lukumäärä oli korkein HPS-käsittelyn salaateilla, toiseksi suurin DLC-käsittelyn salaateilla ja pienin LED-käsittelyn salaateilla, mutta erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä ($p=0,08$).

5.1.4 Salaattien korkeus

Molempien kokeiden lopussa määritettiin myös salaattien korkeudet. Erityisesti valon laatu vaikuttaa kasvin nivelvälien venymiseen, joka voi johtaa erilaiseen salaatin pituuskasvuun. Kummassakaan kokeessa salaattien korkeuksien keskiarvojen erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä (Taulukko 4).

Taulukko 4. Jääsalaatin (Koe 1) ja tammenlehtisalaatin (Koe 2) lehtien lukumäärät ja korkeudet. Arvot ovat 16 koejäsenen keskiarvoja keskihajontoineen. Samalla kirjaimella merkityt eivät eroa toisistaan tilastollisesti merkitsevästi ($p>0,05$).

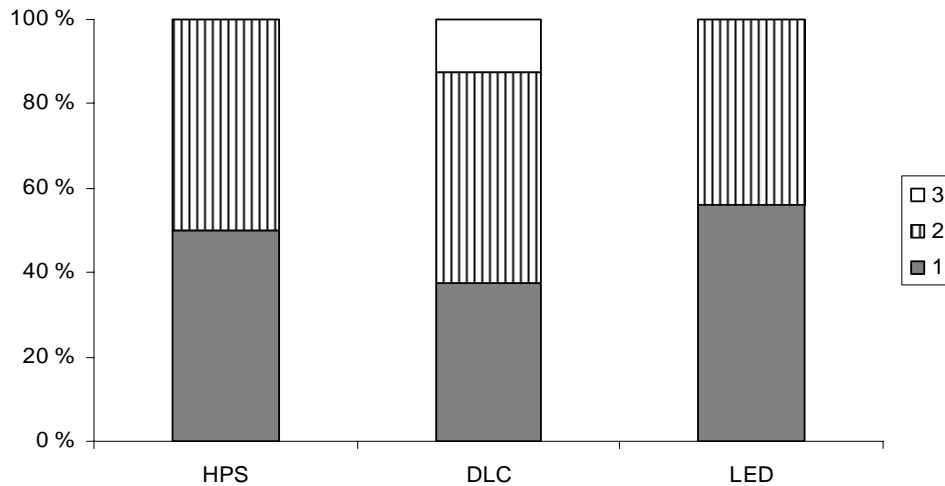
Valaisin	Lehtien lukumäärä (kpl)	Korkeus (cm)
Koe 1		
HPS	32 ± 3 a	19,7 ± 0,8 a
DLC	30 ± 3 b	19,5 ± 1,0 a
LED	32 ± 2 ab	19,7 ± 1,3 a
Koe 2		
HPS	54 ± 5 a	16,2 ± 1,2 a
DLC	51 ± 5 a	17,2 ± 1,0 a
LED	50 ± 5 a	17,5 ± 3,9 a

5.2 Lehdenreunapolte

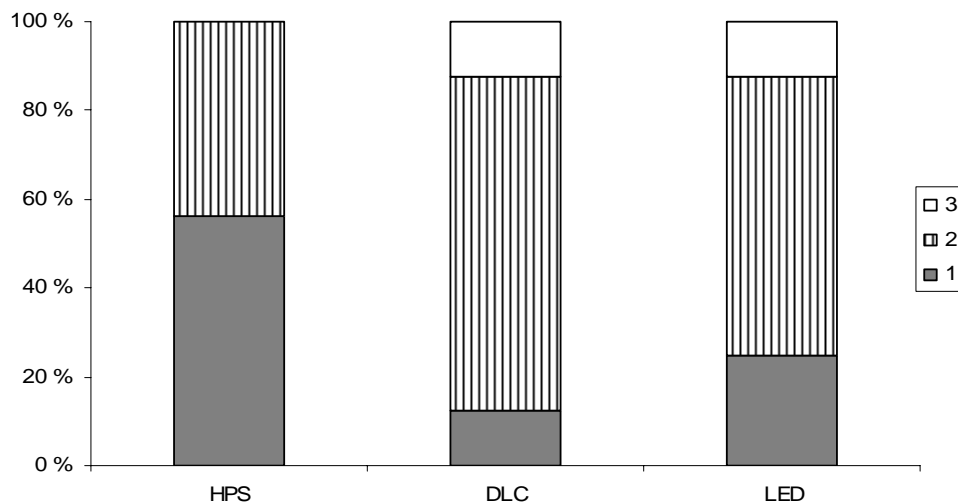
Lehdenreunapolttetta arvioitiin luokka-asteikolla 0-3 kauppapuutarhaliiton laatuohjeiden mukaan. Kaikissa salaateissa oli enemmän tai vähemmän merkkejä lehdenreunapoltteesta kummassakin kokeessa (Kuva 7) Ensimmäisen kokeen jääsalaateilla HPS- ja LED-käsittelyjen välillä ei ollut juurikaan eroja

lehdenreunapoltteessa; suurin osa salaateista sijoittui luokkaan 1, eikä kauppakelvottomia salaatteja ollut ollenkaan. DLC-käsittelyn jääsalaateilla esiintyi selkeästi eniten lehdenreunapoltetta: 50 % jääsalaateista sijoittui luokkaan 2 ja joukkoon mahtui myös kaksi kauppakelvotonta salaattia (luokka-asteikko 3).

A



B

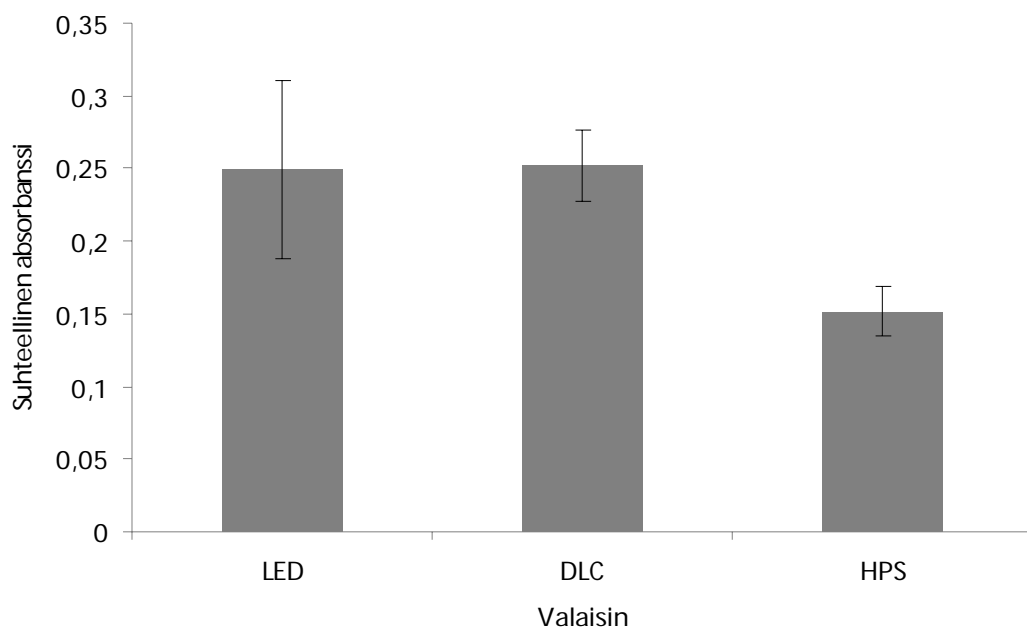


Kuva 7. HPS-, DLC- ja LED-valaisimen vaikutus lehdenreunapoltteen esiintymiseen jääsalaatilla (A) ja tammenlehtisalaatilla (B) luokka-asteikolla 1-3 mitattuna. Luokka 3 edustaa kauppapuutarhaliiton ruukkuvihannesjaoston laatuohjeiden mukaisesti kauppakelvotonta salaattia, luokka 2 edustaa vähäistä määrää lehdenreunapoltetta ja luokka 1 edustaa pieniä lehdenreunapoltteiden oireita.

HPS-valon alla kasvaneilla tammenlehtisalaateilla esiintyi vähiten lehdenreunapoltetta: 56 % salaateista lehdenreunapoltetta esiintyi vain vähän (luokka-asteikko 1), eikä yksikään salaateista ollut kauppakelvottomia. LED- ja DLC-valaisimien alla kasvaneista salaateista suurin osa asettui luokkaan 2. Kaksi koejäsenistä oli kauppakelvottomia kunnossa kummassakin käsittelyssä.

5.3 Antosyaanipitoisuus

Valon laadun tiedetään vaikuttavan antosyaanien synteysiin kasveilla. LED- ja HPS-valaisimien spektrit erosivat toisistaan ja tämän kokeen tavoitteena oli tutkia, miten nämä valaisimet vaikuttavat punalehtisen tammenlehtisalaatin värinmuodostumiseen. Viljelijöillä on tyypillisesti ollut vaikeuksia saada punalehtisiä salaattilajikkeita väritymään talvella, jolloin kasvit ovat pitkälle tekovalon varassa. Verrattaessa antosyaanien suhteellista absorbanssia, kokonaisantosyaanipitoisuus oli LED- ja DLC-käsittelyn salaateilla noin kaksinkertainen verrattaessa HPS-käsittelyn salaatteihin, mutta ilmeisesti hajonta oli niin suurta, että erot käsittelyjen välillä eivät olleet tilastollisesti merkitseviä ($p=0,09$)(Kuva 8).



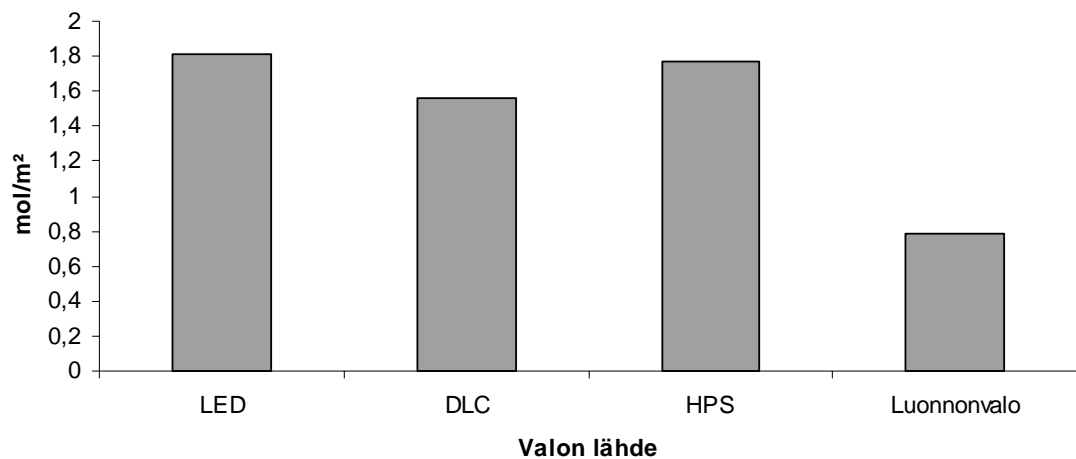
Kuva 8. Suhteelliset antosyaanipitoisuudet LED-, DLC- ja HPS- valaisimien alla kasvaneilla tammenlehtisalaateilla. Arvot ovat kahdeksan eri näytteen (kolme toistoa/näyte) keskiarvoja. Pystypalkit kuvaavat keskihajontoja. Erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä

5.4 Valon määrä

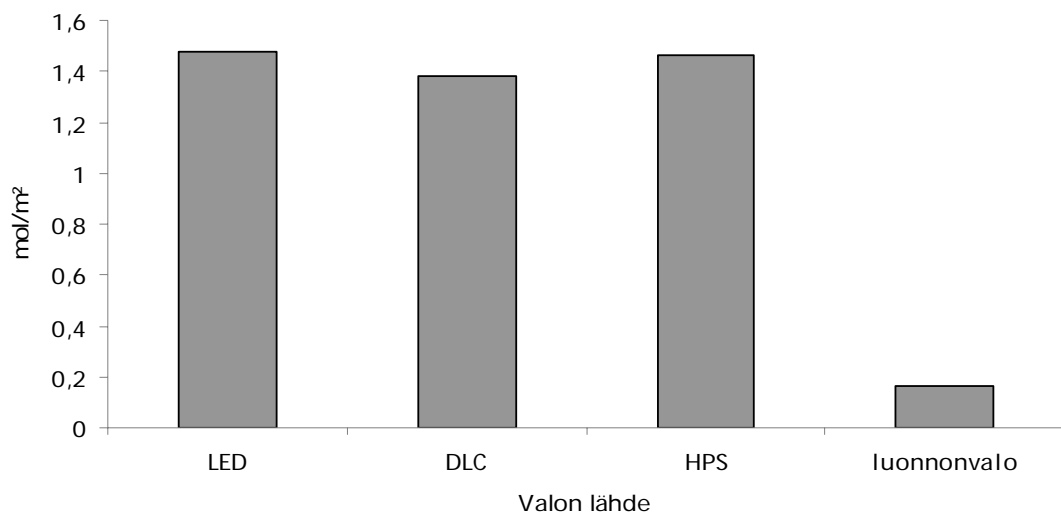
5.4.1 Säteilysummat ja luonnonvalon osuus

Yhteenlaskettu kokonaissäteilyn määrä (mol/m^2) oli kontrollilamppujen välillä lähes sama; LED-valaisimen alle kertyi kokeen 1 aikana 2% enemmän valoa kuin HPS-valaisimen alle (Kuva 9). DLC-valaisimen säteilysumma oli noin 14% alhaisempi kuin kontrollilampoilla, johtuen DLC-sensorin toiminnasta. Luonnonvalon osuus kokonaissäteilystä oli kontrollilamppujen alla noin 40% ja DLC-lampun alla noin 50%.

A



B

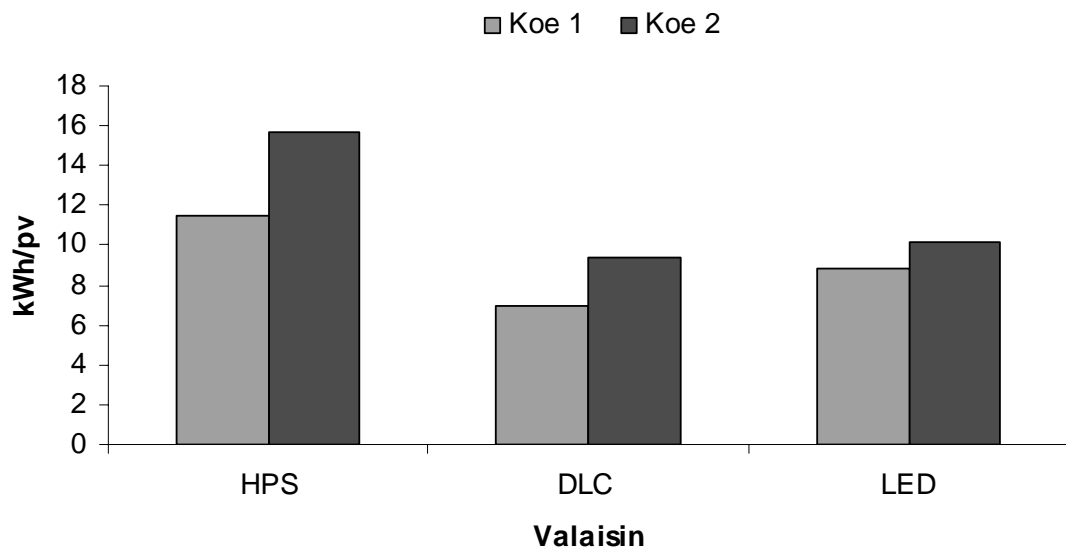


Kuva 9. Yhteenlaskettu säteilyn määrä kunkin lampun alla ja luonnonvalo ensimmäisen (A) ja toisen (B) kokeen aikana.

Toisen kokeen aikana marras-joulukuussa luonnonvalon osuus oli enää vain noin 10% kunkin lampun alle kerääntyneestä säteilysummasta (Kuva 9). Vähäisestä luonnonvalon määrästä johtuen DLC:n säteilysumma oli tässä kokeessa vain noin 6% pienempi kuin HPS- ja 5% pienempi kuin LED-valaisimien alla. LED- ja HPS-valaisimien välinen ero oli noin 1%.

5.5 Sähkönkulutus

Ensimmäisen kokeen aikana, syys-lokakuussa DLC-lamppu kulutti 24% vähemmän sähköä kuin LED- ja 37% vähemmän sähköä kuin HPS-valaisin (Kuva 10). Toisessa kokeessa, marras-joulukuussa vastaava ero oli enää 8% LED-valaisimeen ja 28% HPS-valaisimeen verrattuina DLC- alaisimen eduksi. Sekä ensimmäisessä, että toisessa kokeessa LED-valaisin kulutti 22% vähemmän sähköä kuin HPS-valaisin.



Kuva 10. LED,- DLC- ja HPS-valaisimien suhteellinen sähkönkulutus kWh/pv ensimmäisen ja toisen kokeen aikana 18 tunnin valojaksolla.

5.6 Valaisimen vaikutus kasvuston lämpötilaan

5.6.1 Ilman lämpötila, lehden lämpötila ja suhteellinen kosteus kasvustossa

Valaisin vaikuttaa myös kasvuston mikroilmastoon ja sitä kautta kasvien kasvuun kasvihuoneessa. HPS-valaisimen alla kasvustossa oli kummankin kokeen aikana keskimäärin noin 1°C asteen lämpimämpää kuin DLC- ja LED-valaisimien alla (Taulukko 5.). Suhteellinen ilmankosteus oli HPS-valaisimen alla kasvustossa 2-3% -yksikköä alhaisempi kuin DLC- ja LED-valaisimien alla. HPS-valaisimen alla oli siis lämpimämpää ja kuivempaa. Jotta valaisimen vaikutusta salaattien haihdutukseen ja kasvuun pystyttiin arvioimaan, mitattiin myös lehden lämpötilat infrapunakameralla kolme kertaa jääsalaatilla ja kaksi kertaa tammenlehtisalaatilla.

Taulukko 5. Kasvuston lämpötila (C°) ja suhteellinen ilmankosteus (RH%) HPS-, DLC- ja LED-valaisimien alla jääsalaatilla (koe 1) ja tammenlehtisalaatilla (koe 2). Taulukossa laskettuna keskiarvot \pm keskihajonnat ajanjaksoilta, jolloin lamput olivat päällä, mutta luonnonvaloa ei ollut. Mittaustulokset ovat mitattu dataloggereilla kasvustosta 5 minuutin välein kunkin kokeen ajalta.

Valaisin	Ilman lpt (C°)	RH (%)
Koe 1		
HPS	19,8 \pm 0,1	54,6 \pm 0,2
DLC	18,8 \pm 0,1	56,9 \pm 0,4
LED	18,6 \pm 0,1	57,6 \pm 0,4
Koe 2		
HPS	19,2 \pm 1,1	45,0 \pm 7,2
DLC	18,2 \pm 0,6	48,0 \pm 9,1
LED	18,2 \pm 0,6	48,5 \pm 10,2

Kaikissa mittauksissa jääsalaatin lehdenpinnan ja ilman lämpötilan keskiarvo oli korkeampi HPS-käsittelyn salaateilla verrattuna LED- ja DLC-käsittelyjen salaatteihin (Taulukko 6.). Suhteellinen ilmankosteus kasvustossa oli myös kaikissa mittauksissa alhaisin HPS-käsittelyssä verrattuna LED- ja DLC-käsittelyihin. Laskennallinen VPD-arvo (kPa) oli näin ollen kaikissa mittauksissa korkein HPS-käsittelyn salaateilla.

Taulukko 6. Tulokset ovat lehdenpinnan lämpötilan mittauksista 13.10. ja 26.10. Flir-infrapunakameralla ja 27.10.2010 Fluke-infrapunakameralla DLC-, HPS ja LED-valaisimien alla kasvaneista jääsalaateista. Ilman lämpötilojen ja suhteellisten ilmankosteuksien keskiarvot kasvustossa on mitattu klo 6-8 aikaan, joiden mukaan on laskettu VPD-arvot. Mittaukset ovat 12 kasvin keskiarvoja jokaisesta käsittelystä.

Valaisin	Lehden lpt (C°)	Ilman lpt (C°)	RH (%)	VPD (kPa)
13.10.2010				
HPS	17,2 ± 0,2	19,7 ± 0,4	46,1 ± 0,9	0,90
DLC	16,4 ± 0,2	18,7 ± 0,2	47,8 ± 0,9	0,83
LED	16,4 ± 0,1	18,5 ± 0,2	48,4 ± 0,6	0,83
26.10.2010				
HPS	17,5 ± 0,2	18,6 ± 0,3	61,0 ± 0,7	0,69
DLC	16,6 ± 0,2	18,0 ± 0,4	63,9 ± 2,3	0,57
LED	16,6 ± 0,2	17,5 ± 0,2	68,8 ± 6,4	0,51
27.10.2010				
HPS	16,4 ± 0,3	17,6 ± 0,2	58,5 ± 1,3	0,69
DLC	15,3 ± 0,3	17,1 ± 0,5	68,1 ± 5,5	0,40
LED	15,5 ± 0,2	16,7 ± 0,3	65,7 ± 6,3	0,51

Molemmissa mittauksissa toisen kokeen aikana tammenlehtisalaatin lehdenpinnan ja ilman lämpötilan keskiarvo oli korkein HPS-käsittelyn salaateilla verrattuna LED- ja DLC-käsittelyn salaatteihin (Taulukko 7.). Suhteellinen ilmankosteus mittauksissa oli alhaisin HPS-käsittelyssä, joten laskennallinen VPD-arvo oli korkein kummassakin mittauksessa HPS-käsittelyn salaateilla, kuten ensimmäisenkin kokeen aikana..

Taulukko 7. Tulokset ovat lehdenpinnan lämpötilan mittauksista Fluke-infrapunakameralla 26.11. ja 2.12.2010 DLC-, HPS ja LED-valaisimien alla kasvaneista tammenlehtisalaateista. Ilman lämpötilojen ja suhteellisten ilmankosteuksien keskiarvot kasvustossa on mitattu klo 7-8 aikaan, joiden mukaan on laskettu VPD-arvot. Mittaustulokset ovat 12 kasvin keskiarvoja jokaisesta käsittelystä.

Valaisin	Lehden lpt (C°)	Ilman lpt (C°)	RH (%)	VPD (kPa)
26.11.2010				
HPS	18,0 ± 0,3	18,8 ± 0,8	33,2 ± 3,4	1,34
DLC	16,7 ± 0,3	17,9 ± 0,3	34,5 ± 0,8	1,19
LED	16,4 ± 0,3	18,1 ± 0,2	34,3 ± 0,8	1,15
2.12.2010				
HPS	19,6 ± 0,3	18,6 ± 0,3	53,5 ± 2,6	1,13
DLC	18,0 ± 0,3	18,1 ± 0,2	52,2 ± 1,1	0,98
LED	17,1 ± 0,3	18,0 ± 0,3	52,9 ± 0,6	0,86

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Valon laadun ja määrän vaikutus kasvuun

6.1.1 Tuorepaino

Ensimmäisen kokeen HPS- ja LED-käsittelyjen säteilysummat olivat lähes yhtäsuuret, kun taas DLC-käsittelyn säteilysumma jäi 14% alhaisemmaksi. DLC-käsittelyn salaattien keskimääräinen tuorepaino oli jopa noin 28% pienempi verrattuna HPS- ja LED-käsittelyn salaatteihin. Ito (1989) kokeissa valotason nostaminen 50% nosti salaattien tuorepainoa n.50% valotason ollessa alle $280 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Valotaso nostettaessa 280 :stä $420 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$:iin, salaattien tuorepaino nousi enää 6%. Tässä tutkimuksessa minimi-valotasoksi oli määritetty $150 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, joka on suhteellisen alhainen salaatile. Ideaalina valotasona salaatile tuorepainon kehityksen kannalta on monien tutkimuksien perusteella noin $300 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Ikeda ym. 1988, Ito 1989, Jokinen & Tahvonen 1991, Oda & Aoki 1988). DLC-sensori pyrki pitämään valotason koko ajan $150 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$:ssa, kun LED- ja HPS-valot sammuihin vasta kun kasvihuoneeseen sisään tullut luonnonvalo oli saavuttanut $300 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. HPS- ja LED-käsittelyjen salaattit saivat siis enemmän voimakkaamman intensiteetin valoa (150 - $300 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Tammenlehtisalaatilla kaikkien valaisimien säteilysummat olivat lähes samat. HPS-käsittelyn salaattit olivat kuitenkin huomattavasti painavampia kuin LED- ja DLC-käsittelyn salaattit. Toisen kokeen aikana marras-joulukuussa kertyneen PAR-luonnonvalon määrä kasvihuoneen sisällä oli vain noin 10% kasvien saamasta kokonaissäteilystä, kun ensimmäisen kokeen aikana luonnonvalon osuus oli noin puolet kertyneestä kokonaissäteilystä (Kuva 12). Ensimmäisen kokeen viikkoihin mahtui lisäksi hyvinkin aurinkoisia päiviä. Kokonaisuudessaan tekovalojen osuutta salaattien kasvuun, erityisesti valon laadun kannalta, on vaikea arvioida ensimmäisen kokeen osalta, koska luonnonvalon osuus oli suhteessa niin suuri koko säteilysummaan. Toisessa kokeessa tammenlehtisalaatilla taas tekovalojen vaikutus kasvuun korostui luonnonvaloa ollessa tarjolla paljon vähemmän. Autio ja Voipio (1994) totesivat kokeissaan eri salaattilajikkeiden kasvaneen hyvinkin eri vauhtia saman valonlaadun alla. Osa myös kasvoi paremmin luonnonvalossa ja osa suhteessa paremmin pelkässä tekovalossa. Kyse saattaa olla myös lajikeominaisuudesta, miksi tammenlehtisalaatti

kasvoi samalla säteilynmäärällä hitaammin LED-valaisimen alla kuin HPS-valaisimen alla verrattuna ensimmäisen kokeen jääsalaattiin, joka kasvoi samaa vauhtia kummankin valaisimen alla. Toisen kokeen aikana viileämpi ilmasto kasvihuoneessa saattoi myös hidastaa LED- ja DLC-käsittelyjen salaattien kasvua verrattuna HPS-käsittelyn salaattien kasvuun. HPS-valaisimen alla oli selkeästi lämpimämpää kuin LED- ja DLC-valaisimien alla, johtuen pääosin HPS-valaisimen lämpösäteilystä.

Krizek ja Ormrod (1980) tutkivat kokeissaan loisteputkien ja hehkulamppujen yhdistelmien vaikutusta salaatin kasvuun. PAR-taso oli kaikilla salaateilla sama (noin $300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), mutta kokonaissaäteilyn määrä aallonpituusalueella 280 nm-2800 nm vaihteli välillä 102-193 W/m². Neljän viikon ikäiset 'Grand Rapids'-lehtisaalatit olivat sitä suurempia, mitä suurempi oli hehkulamppuista saadun lämpösäteilyn määrä. Sager (1984) osoitti myös lämpösäteilyn vaikuttaneen lehtisalaatin ('Black Seeded Simpson') kasvuun positiivisesti alhaisemmissa lämpötiloissa, mutta yli 24°C:ssa lämpösäteily vähensi kasvua.

LED- ja DLC-käsittelyjen tammenlehtisalaattien tuorepainojen erot eivät olleet tilastollisesti merkittäviä. Kuitenkin, LED-käsittelyn säteilysumma oli 5% suurempi kuin DLC-käsittelyn säteilysumma, mutta LED-salaattien keskimääräinen tuorepaino (86,17 g) oli silti hieman alhaisempi kuin DLC-käsittely salaattien keskimääräinen tuorepaino (93,63 g). Kuten mainittu, ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä, mutta toisaalta varianssianalyysin luotettavuus tässä kokeessa on hieman kyseenalainen; yksisuuntaisen varianssianalyysin oletuksena on, että käsittelyt olisivat samoissa lohkoissa, jotta kasvuolosuhteet olisivat keskimääräisesti samanlaiset kaikissa käsittelyissä. Tämä ei kuitenkaan olisi ollut käytännössä mahdollista tässä kokeessa. Kukin käsittely oli erikseen omassa tilassaan ja varianssianalyysi ei ota huomioon esimerkiksi koealueiden erilaisia lämpötilaeroja, vaan vertailee pelkästään valaisimen vaikutusta salaatteihin. Kokeessa LED-valaisimien alla oli hieman viileämpää kuin DLC-käsittelyn salaattien alla. Kasvihuoneen lämmitysputket eivät toimineen niin tasaisesti kuin niiden pitäisi. LED-käsittelyn koealueen lämmitysputket olivat mitattaessa viileimmät ja HPS-käsittelyn koealueen lämmitysputket taas lämpimimmät. Näin ollen myös kasteluveden lämpötila oli viileintä LED-käsittelyn salaateilla (Liite 5). Tämä voi olla syynä LED-käsittelyn salaattien hitaimpaan kasvuun verrattuna DLC-käsittelyn salaatteihin.

6.1.2 Kuivapaino

Kummassakin kokeessa kuivapaino korreloi odotetusti tuorepainon kehityksen kanssa. Kuiva-ainepitoisuudessa oli sen sijaan hiukan eroja; Ensimmäisen kokeen jääsalaateilla alhaisin pitoisuus oli HPS-käsittelyn salaateilla (3,2%). Kuiva-ainepitoisuus oli LED-käsittelyn salaateilla 3,3% ja DLC-käsittelyn salaateilla 3,6%. Toisen kokeen HPS-käsittelyn tammenlehtisalaattien kuivapainopitoisuus oli 4,0%, DLC-käsittelyn tammenlehtisalaattien 4,4% ja LED-käsittelyn salaattien 4,6% . Kuiva-ainepitoisuus oli siis kussakin tapauksessa suurin pienimmiksi jääneillä salaateilla. Samansuuntaisia tuloksia saivat myös Voipio ja Autio kokeissaan (1991): Salaattien kuiva-ainepitoisuus laski lämpösäteilyn kasvaessa ja samalla nitrattipitoisuus nousi. Myös Iton (1989) mukaan suhteellisen alhainen kuivapaino saattaa johtua suuremmasta haihdutuksesta, jolloin kasvi kuluttaa enemmän sokereita hengitykseen, kun taas vähemmän haihduttavalla kasvulla jää enemmän sokereita rakennusaineiksi. Kummassakin kokeessa HPS-käsittelyn salaateilla oli korkeimmat VPD-arvot, joka viittaa suurempaan haihdutukseen verrattuna LED- ja DLC-käsittelyn salaatteihin.

6.1.3 Lehtien lukumäärä ja salaattien korkeus

Ensimmäisessä kokeessa lehtien lukumäärä erosi vain HPS- ja DLC-käsittelyjen jääsalaattien välillä. Tämä on linjassa salaattien tuorepainon kertymän, eli kasvunopeuden kanssa – suurimmilla salaateilla oli eniten lehtiä. Näin myös Jokinen & Tahvonen (1991) totesivat kokeissaan. Toisessa kokeessa lehtien lukumäärien erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, mutta jälleen isoimmilla salaateilla oli keskimääräisesti eniten lehtiä ja vähiten lehtiä oli pienimmillä salaateilla. Kummassakaan kokeessa salaattien korkeuksien erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.

6.2 Salaattien ulkoinen laatu

6.2.1 Lehdenreunapolte

Lehdenreunapoltetta esiintyi ensimmäisessä kokeessa eniten DLC-käsittelyn jääsalaateilla. HPS- ja LED-käsittelyjen salaateissa ei eroja juurikaan ollut. Toisessa kokeessa eniten lehdenreunapoltetta esiintyi LED- ja DLC-käsittelyjen salaateilla ja

vähiten HPS-käsittelyn salaateilla. Kaikkien salaattien kasteluveden johtoluku tarkistettiin kolme kerta viikossa kummankin kokeen aikana, joten ravinteiden ja vedensaanti on ollut oletettavasti samanlainen kaikilla kokeen kasveilla, eikä siten ole vaikuttanut lehdenreunapolteen esiintymiseen (Liitteet 1 ja 2).

Keskimääräinen ilmanlämpötila kasvustossa oli kummassakin kokeessa hieman korkeampi HPS- kuin LED- ja DLC-käsittelyn salaateilla. Keskimääräinen suhteellinen ilmankosteus taas oli pääasiallisesti alhaisin HPS-käsittelyn salaateilla kummankin kokeen aikana. HPS-salaateilla ilma oli siis kuivinta ja lämpimintä, joka oletettavasti lisää salaatin haihdutusta ja edistää siten myös kalsiumin kulkeutumista lehden reunoille asti (Clarkson 1984, Oda & Tsuji 1992). Viileämpi ja kosteampi ilma, kuten LED- ja DLC-käsittelyn salaateilla, taas vähentää haihdutusta, joka saattaa vähentää kalsiumin kulkeutumista uloimpiin lehtiin (Frantz & Richie 2004). Saure (1998) arvio, että lehdenreunapolte on seuraus kasvuolosuhteiden aiheuttamasta stressistä. Myös Tibbits & Rao (1968) totesivat lehdenreunapoltetta esiintyneen vähiten salaateilla, jotka olivat altistuneet vähiten stressille. Näyttäisi siltä, että HPS-käsittelyssä VPD-arvo pysyi optimaalisempana haihdutuksen kannalta kuin LED- ja DLC-käsittelyissä. Oli kyse sitten stressistä tai kalsiumin kulkeutumisesta uloimmille lehdille, joka tapauksessa kummassakin kokeessa olosuhteet olivat HPS-käsittelyssä paremmat lehdenreunapolteen esiintymisen kannalta.

6.2.2 Antosyaanipitoisuus

Eri käsittelyissä kasvaneiden salaattien antosyaanipitoisuuksien erot eivät olleet tilastollisesti merkitsevät, sillä hajonta oli niin suurta tulosten välillä. P-arvo jäi kuitenkin aika lähelle merkitsevää eroa ($p=0,09$) ja LED- ja DLC-käsittelyjen salaattien keskimääräinen antosyaanipitoisuus oli kuitenkin noin kaksinkertainen verrattaessa HPS-käsittelyn salaatteihin. Valon laadun tiedetään vaikuttavan kasvien antosyaanien tuotantoon (Braun & Tevini 1993). UV-valo ja sininen valo ovat tiedettävästi tehokkaimmat edistämään antosyaanien tuotantoa, mutta tässä kokeessa valaisimien erot eivät olleet suuret; HPS-valaisimen spektristä 5% oli sinistä valoa ja LED-valaisimilla 7%. UV-valoa oli LED-valaisimen spektristä vain 0,15% ja HPS-valaisimen spektristä 0,5%. Sen sijaan, LED- ja DLC-käsittelyjen salaatit saivat noin 17% enemmän punaista valoa kuin HPS-käsittelyn salaatit. Myös punaisen valon on todettu lisäävän

antosyaanien tuotantoa, vaikka se ei olekaan yhtä tehokasta kuin sininen ja UV-B -valo (Neill & Gould 2003, Stutte & Edney 2009).

LED- ja DLC-käsittelyn salaateilla oli myös viileämpää kuin HPS-käsittelyn salaateilla. Tämä vaikutti myös kasteluveden lämpötilaan, joka oli kummassakin kokeessa selkeästi lämpimintä HPS-käsittelyn salaateilla (Liite 5). Voipio ja Autio (1995) osoittivat kokeissaan viileämmän kasteluveden edistävän antosyaanien muodostumista salaateilla. Antosyaanien muodostumisen tiedetään olevan stressireaktio kasveilla. Viileämmät kasvuolosuhteet ovat saattaneet vaikuttaa suurempaan antosyaanien muodostumiseen LED- ja DCL-käsittelyn salaateilla. Joka tapauksessa, pitoisuudet jäivät suhteellisen alhaiseksi kummassakin kokeessa, eivätkä salaatit olleet erityisen punaisia LED-valaisimienkaan alla.

6.3 DLC- sensori ja sähkönkulutus

DLC-valaisin kulutti kummassakin kokeessa vähiten sähköä, mutta verrattaessa kulutettua sähkönmäärää salaatin tuorepainon kertymistä kohden, hyötysuhde jäi ensimmäisessä kokeessa alhaisemmaksi kuin LED-valaisimella ilman DLC-sensoria. Ensimmäisessä kokeessa DLC-käsittelyn salaattien keskimääräinen tuorepaino oli 170 g ja sähkönkulutus yhteensä 196 kWh. Eli DLC-käsittelyn salaatti tuotti 0,87 g salaattia per kulutettu kilowattitunti. LED-valaisimella vastaava luku oli 0,88 g/kWh.

Toisessa kokeessa DLC-valaisimen vastaava arvo oli 0,27 g/kWh, kun se oli LED-valaisimella 0,22 g/kWh. DLC-valaisin kulutti hiukan vähemmän sähköä kuin LED-valaisin ja DLC-salaatit olivat keskimääräisesti hiukan isompia kuin LED-salaatit pienemmästä säteilysummasta huolimatta. Tämä ero johtui luultavasti kuitenkin koealueiden lämpötilaeroista, eikä valaisimista.

HPS-valaisimen hyötysuhdetta ei voi vertailla vastaavasti, sillä sen valo levisi paljon suuremmalle alueelle kuin kokeessa käytettyjen LED-valaisimien valo. HPS-valaisin olisi siis pystynyt tuottamaan isommallakin alalla salaattia käyttämillään kilowattitunneillaan.

Jotta todellinen hyötysuhde ja LED-valaisimien tehokkuus verrattuna HPS-valaisimeen olisi saatu mitattua, olisi koe pitänyt järjestää isommassa mittakaavassa ja koetta olisi pitänyt jatkaa ympäri vuoden. DLC-sensorin merkitys korostuu syksyllä ja keväällä ja siitä saadaan suurin hyöty pilvisinä päivinä, jolloin nykyinen tekniikka ei pysy mukana luonnonvalon nopeissa muutoksissa. Toisen kokeemme aikana oli huomattavissa, että luonnonvaloa oli jo niin vähän, että DLC-sensorin ei tarvinnut juurikaan toimia vaan valaisin antoi valoa täydellä teholla lähes koko päivän ajan, kuten kontrollivalaisin.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Salaattien kasvu ei eronnut HPS- ja LED-käsittelyjen välillä samalla valon intensiteetin tasolla ensimmäisessä kokeessa. Valon laatu tai erilaiset kasvuston lämpötilat eivät vaikuttaneet merkittävästi jääsalaatin tuorepainon kehitykseen tai salaatin ulkoiseen laatuun. Tämän kokeen perusteella lämminvalkoisella LED-valaisimella pystyttiin kasvattamaan kauppakuntoista jääsalaattia.

Toisessa kokeessa LED-käsittelyn salaattit jäivät huomattavasti pienemmiksi kuin HPS-käsittelyn salaattit lähes samasta säteilysummasta huolimatta. LED-valaisimen valon laadun ero HPS-valaisimeen korostui, koska luonnonvaloa oli huomattavasti vähemmän kuin ensimmäisessä kokeessa tai kasvuston viileämpi lämpötila vaikutti tammenlehtisalaattien tuorepainon kehitykseen. Myös tammenlehtisalaatti 'Rouxai' lajikkeena saattoi reagoida eri tavalla LED-valaisimen valon laatuun kuin jääsalaatti ensimmäisessä kokeessa. Verrattuna HPS-käsittelyn salaatteihin, LED-käsittelyn salaattit jäivät kokeessa huomattavasti pienemmiksi, lehdenreunapoltetta esiintyi enemmän, eikä LED-valaisin lisännyt punaisen värin muodostumista tammenlehtisalaatilla.

HPS- ja LED-valaisimien mikroilmastot kasvustossa olivat erilaiset, joka näyttäisi myös vaikuttaneen salaattien kasvuun. HPS-valaisimen alla oli selkeästi lämpimämpää ja kuivempaa, joka ilmeisesti vaikutti haihdutukseen. Salaatilla haihdutuksen on todettu olevan suoraan verrannollinen tuorepainon kehitykseen ja HPS-käsittelyn salaattit kasvoivatkin kummassakin kokeessa isommiksi samalla säteilymäärällä verrattuna LED-valaisimeen. Myös lehdenreunapoltetta esiintyi kummassakin kokeessa vähemmän HPS-käsittelyn salaateilla kuin LED-käsittelyjen salaateilla.

Toisessa kokeessa tutkittiin myös valaisimien valon laadun vaikutusta punalehtisen tammenlehtisalaatin värinmuodostukseen. Antosyaanipitoisuus oli kaksinkertainen LED- ja DLC-käsittelyn salaateilla verrattuna HPS-käsittelyn salaatteihin, mutta erot eivät olleet kuitenkaan tilastollisesti merkitseviä. Pitoisuudet jäivät sen verran alhaisiksi kaikilla salaateilla, ettei sillä ole käytännön viljelyssä merkitystä.

LED-valaisin kulutti noin 20% vähemmän sähköä kuin HPS-valaisin kummassakin kokeessa. Kuitenkaan, energiatehokkuutta HPS-valaisimen kanssa ei voi suoraan vertailla, sillä HPS-valaisimen valo kokeessa lankesi paljon isommalle alalle kuin LED-valaisimen valo. Teoreettisessa mallinnuksessa (Pinho ym. 2012) HPS-valaisin oli lähes kaksi kertaa energiatehokkaampi (W/m^2) kuin lämminvalkoinen LED-valaisin hehtaarin alalla. LED-valot kehittyvät nopeasti ja jo nyt on olemassa energiatehokkaampia LED-polttimoita kuin kokeessamme käytetyt lämminvalkoiset LED-polttimot. LED-valojen tiedetään olevan pitkäikäisiä, mutta pidemmän aikavälin kokeiluja kasvihuonetuotannossa LED-valaisimista ei toistaiseksi ole. LED-valoihin siirtyminen olisi viljelijälle suuri investointi ja tekniikan kestävydestä ja huollon kustannuksista pitäisi olla parempaa tietoa tai takuuta.

DLC-sensorin tarkoitus oli tehostaa LED-valaisimen energiatehokkuutta hyödyntämällä tehokkaammin luonnonvaloa. DLC-sensori toimi kokeessa kuten oli suunniteltukin, mutta se ei osoittautunut hyödylliseksi. DLC-sensorin raja-arvo olisi voinut olla korkeampi, eli salaattien saama minimivalotaso olisi voinut olla lähempänä optimia ruukkusalaatin tuorepainon kehityksen kannalta. Tulevaisuudessa, vastaava sensori voisi mahdollistaa valon intensiteetin, ja myös laadun, portaattoman säädön ohjaamisen kasvihuoneessa. Sensorin ja valaisimet voisi liittää kasvihuoneautomaatiikkaan, jolloin valon määrää ja laatua voitaisiin optimoida luonnonvalon ja viljeltävän kasvin mukaan halutunlaiseksi.

Toistaiseksi valkoisien LED-valaisimien sopivuutta kasvintuotantoon on tutkittu vähän yhdistettynä luonnonvaloon. LED-valot mahdollistavat minkälaisen tahansa spektrin luomisen, mutta vieläkö ei ole täysin selvinnyt, millainen valon laatu olisi kasveille paras mahdollinen. Myös valaisimen lämpösäteilyllä näyttää olevan merkitystä. Lisätutkimusta siis tarvitaan niin tekniikan kuin biologiankin puolelta, jotta pystytään kehittämään tehokkaampia kasvivaloja kasvihuonetuotantoon.

8 KIITOKSET

Tässä projektissa on ollut mukana monia henkilöitä ja eri tahoja, joita haluan kiittää. Ensimmäisenä välitän kiitokseni Aalto yliopiston valaistusyksikölle ja kaikille yhteistyökumppaneille. Projektin päärahoittajana toimi Tekes ja mukana oli myös Puutarhasäätiö sekä useita yrityksiä: Arrant Light Oy, Elekno Oy, Elektro-Valo Oy/Helle Oy, Greenlux Oy, I-Valo Oy, Oy MTG-Meltron Ltd ja Osram Oy.

Suuri kiitos kuuluu maataloustieteen laitoksen puutarhatieteiden professori Paula Elomaalle ja maatalous ja metsätieteiden tohtori Timo Hytöselle ohjauksesta, asiantuntemuksesta, kärsivällisyydestä ja kannustavasta kritiikistä. Olen oppinut teiltä paljon. Kiitän myös suuresti maatalous ja metsätieteiden maisteria, tutkija Marja Rantasta henkisestä tuesta, tulosten tulkinnasta ja korvaamattomasta avusta tilastanalyysien kanssa. Suuri kiitos myös avusta koejärjestelyjen kanssa ja kokeen teknisestä toteutuksesta Aalto yliopiston valaistusyksikön tutkijatohtori Paulo Pinholle ja tutkimusassistentti Gonzalo Moreira Nevesille. Mitä suurimmat kiitokset myös avusta, tuesta ja turvasta Helsingin Yliopiston tutkimusteknikko Matti Salovaaralle; ilman asiantuntemustasi ja kokemustasi moni asia olisi jäänyt huomaamatta. Uskollista opiskelukaveriani Tii Mäkelää haluan kiittää hyvistä kommentteista tämän työn suhteen ja kaikista niistä yhteisistä luennoista, ryhmätöistä ja projekteista viimeisen 7,5 vuoden aikana. Viimeisenä haluaisin vielä kiittää isääni Juhani Kaustetta, joka on aina kannustanut, tukenut ja auttanut minua luonnontieteiden opiskelussa. Tästä on hyvä jatkaa!

9 LÄHTEET

Agata, W., Kawamitsu, Y., Hakoyama S. & Shima, Y. 1986. A system for measuring leaf gas exchange based on regulating vapour pressure difference. *Photosynthesis Research* 9:345-357

Ahmad, M. & Cashmore, A.R. 1993. *HY4* gene of *A. thaliana* encode a protein with characteristics of a blue-light photoreceptor. *Nature*. 366:162-166

Autio, J. & Voipio, I. 1994. Liikkuvan tekovalon ja UV-A –säteilyn vaikutus ruukkuvihannesten kasvuun ja laatuun. Helsingin Yliopiston Kasvintuotantotieteiden laitoksen julkaisuja, projektiraportti. 46 s.

Banerjee, R. & Batschauer, A. 2005. Plant blue-light receptors. *Planta* 220:498-502

- Banerjee, R., Schleicher, E., Meier, S., Viana, R.M., Pokorny, R., Ahmad, M., Bittl, R. & Batschauer, B. 2007. The Signaling State of *Arabidopsis* Cryptochrome 2 Contains Flavin Semiquinone. *Journal of Biological Chemistry* 282(20):14916-14922
- Blom-Zandstra, M. & Lampe, J. E. M. 1985. The role of nitrate in the osmoregulation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown at different light intensities. *Journal of Experimental Botany* 36: 1043–1052.
- Borthwick, H.A., Hendricks, S.B, Parker, M.W, Toole, E.H. & Toole, V. 1952. A Reversible Photoreaction Controlling Seed Germination. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* vol. 38(8):662-66
- Bouly, J.-P., Schleicher, E., Dionisio-Sese, M., Vandenbussche, F., Van Der Straten, D., Bakrim, N., Meier, S., Batschauer, A., Galland, P., Bittl, R. & Ahmad, M. 2007. Cryptochrome blue light photoreceptors are activated through interconversion of flavin redox states. *The Journal of Biological Chemistry* 282(13):9383-9391
- Braun, J. & Tevini, M. 1993. Regulation of UV- protective pigment synthesis in the epidermal layer of rye seedlings (*Secale cereal* L. cv. Kustro). *Photochemistry and Photobiology* 57:318-323
- Briggs, W.R.1963. The phototropic response of higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 14:311-352
- Bulle, A. 2005. Effects of growth conditions on postharvest life of pot plants, nursery comparisons with cyclamen, begonia and poinsettia. *Acta Horticulturae* 669:263-268
- Chory, J., Chatterjee, M., Cook, R.K., Elich, T., Frankhauser, C., Li, J., Nagpal, P., Neff, M., Pepper, A., Poole, D., Reed, J. & Vitart, V. 1996. From seed germination to flowering, light controls plant development via the pigment phytochrome. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 93:12066-12071
- Christie, J.M., Salomon, M., Nozue, K., Wada, M. & Briggs, W.R. 1999. LOV (light, oxygen, or voltage) domains of the blue light photoreceptor phototropin (nph1): binding sites for the chromophore flavin nucleotide. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96:8779-8783
- Clack, T., Mathews, S. & Sharrock R.A. 1994. The phytochrome family in *Arabidopsis* is encoded by five genes: the sequences and expression of *PHYD* and *PHYE*. *Plant Molecular Biology* 25:413-427
- Clarkson, D.T.1984. Calcium transport between tissues and its distribution in the plant. *Plant Cell Environment* 7:499-456
- Dougher, T.A. & Bugbee, B.2001. Evidence for yellow light suppression of lettuce growth. *Photochemistry and Photobiology* 73:208-212
- Elintarviketurvallisuusvirasto Evira 2012.Nitraatin enimmäispitoisuusrajat. Annettu 22.12.2011. Helsinki, Suomi.
http://www.evira.fi/portal/fi/elintarvikkeet/tietoa_elintarvikkeista/elintarvikevaarat/elintarvikkeiden_luontaiset_myrkyt/kasvien_nitraatit/ Julkaistu 22.12.2011, viitattu 2012.

- Enninghorst, A. & Lippert, F. 2003. Postharvest Changes in Carbohydrate Content of Lamb's Lettuce (*Valerianella locusta*). *Acta Horticulturae* 604:553-558
- Folta, M.K. & Maruhnich, S.A. 2007. Green light: a signal to slow down or stop? *Journal of experimental Botany* 1-13 s.
- Folta, M.K. & Kayla, S.C. 2008. Light as a growth regulator: Controlling plant biology with narrow-bandwidth solid-state lighting system. *Horticultural Science* 43(7):1957-1964
- Franklin, K.A. 2008. Shade avoidance. *New Phytologist* 179:930-944
- Frantz, J.M. & Ritchie, G. 2004. Exploring the Limits of Crop Productivity: Beyond the Limits of Tipburn in Lettuce. *Journal of American Society for Horticultural Science* 129(3):331-338
- Hovi, T., Näkkilä, J. & Tahvonen, R. 2004. Interlightning improves production of year-round cucumber. *Scientia Horticulturae* 102(3):283-294
- Ikeda, A., Nakayama, S., Kitaya, Y. & Yabuki, K. 1988. Effects of Photoperiod, CO₂ concentration, and light intensity on Growth and Net Photosynthetic Lettuce and Turnip. *Acta Horticulturae* 229:273-282
- Imaizumi, T., Tran, H.G., Swartz, T.E., Briggs, W.R. & Kay, S.A. 2003. FKF1 is essential for photoperiodic-specific light signaling in *Arabidopsis*. *Nature*, 426:302-306
- Inada, K. & Yabumoto, A. 1989. Effects of Light Quality, Daylength and Periodic Temperature Variation on the Growth of Lettuce and Radish Plants. *Japan Journal of Crop Science* 58(4):689-694
- Ito, T. 1989. More intensive production of Lettuce under artificially controlled conditions. *Acta Horticulturae* 260:381-389
- Jokinen, R. & Tahvonen, R. 1991. Salaatin viljely ja sadon laatu. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 21/91. Jokioinen:MTT. 178 s.
- Kauppapuutarhaliitto ry, Ruukkivihannesjaosto. 2009. Viljelijöiden tarkennukset ruukkusalaattien ja ruukkuyrttien laatuvaatimuksiin. Helsinki, Suomi.
[http://www.kauppapuutarhaliitto.fi/kauppapuutarhaliitto/kplry.nsf/532d131a1644d842c2256c08003342c4/dad031cb9f2849aac225761f00438478/\\$FILE/ruukkusalaatti_laatu%236EE570.pdf/ruukkusalaatti_laatuohje_FIN.pdf](http://www.kauppapuutarhaliitto.fi/kauppapuutarhaliitto/kplry.nsf/532d131a1644d842c2256c08003342c4/dad031cb9f2849aac225761f00438478/$FILE/ruukkusalaatti_laatu%236EE570.pdf/ruukkusalaatti_laatuohje_FIN.pdf). Julkaistu 2009, viitattu 2012.
- Kendrick, R.E. & Kronenberg, G.H.M. 1994. Photomorphogenesis in Plants. 2. painos. Dordrecht, Hollanti: Kluwer Academic Publisher. 803s.
- Kim, B.C., Tennessen, D.J. & Last, R.L. 1998. UV-B- induced photomorphogenesis in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal* 15(5):667-674
- Kim, H.H., Goins, G., Wheeler, R. & Sager, J. 2004. Green-light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth under Red- and Blue-light-emitting Diodes. *Horticultural Science* 39(7):1617-1622

- Kitaya, Y., Niu, G., Kozai, T. & Ohashi, M. 1998. Photosynthetic photon flux, photoperiod, and CO₂-concentration affect growth and morphology of lettuce plug transplants. *HortScience* 33:988-991
- Krizek, D.T., Britz, S.J. & Mirecki, R.M. 1998. Inhibitory effects of ambient levels of solar UV-A and UV-B radiation on growth of cv. 'New Red Fire lettuce'. *Physiologia Plantarum* 103:1-7
- Lin, C., Ahmad, M., Gordon, D. & Cashmore, A.R. 1995. Expression of an *Arabidopsis* cryptochrome gene in transgenic tobacco results in hypersensitivity to blue, UV-A, and green light. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 92:8423-8427
- Lin, C., Ahmad, M., Chan, J. & Cashmore, A.R. 1996. CRY2: a second member of the *Arabidopsis* cryptochrome gene family. *Plant Physiology* 110(3):1047-1048
- Luca, R., Favory, J.-J., Cloix, C., Faggionato, D., O'Hara, A., Kaiserli, E., Baumeister, R., Schäfer, E., Nagy, F., Jenkins, G.I. & Ulm, R. 2011. Perception of UV-B by the *Arabidopsis* UVR8 Protein. *Science* Vol 332:103-106
- Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus. 2011. Puutarhayritysrekisteri 2010. http://www.maataloustilastot.fi/puutarhatilastot-2010_fi. Helsinki, Suomi. Julkaistu 31.3.2011, viitattu 2011.
- Mackerness, S.A.-H. 2000. Plant responses to ultraviolet-B (UV 280-320nm) stress: What are the key regulators? *Plant Growth Regulation* 32:27-39
- Mancinelli, A.L. & Rabino, I. 1975 Photocontrol of Anthocyanin Synthesis. *Plant Physiology* 56:351-355
- Massa, G.D., Hyeon-Hye, K., Wheeler, R.M. & Mitchell, C.A. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *Horticultural Science* 43(7):1951-1956
- Mathews, S. 2006. Phytochrome- mediated development in land plants: red light sensing evolves to meet the challenges of changing light environments. *Molecular Ecology* 15:3483-3503.
- Murdoch, J.B. 1985. *Illumination Engineering – from Edison's Lamp to the Laser*. New York, USA: Machmillian Publishing Company, Inc. 541 s.
- Muurman, T. 2010. Suullinen tiedonanto, Helsinki. Viikki 19.9.2010.
- Moe, R. 1997. Physiological aspects of supplementary lighting in horticulture. *Acta Horticulturae* 418:17-24
- Moe, R., Grimstad, S.O. & Gislerod, H.R. 2006. The use of artificial light in year round production of greenhouse crops in Norway. *Acta Horticulturae* 711:35-42
- Morrow, R. 2008. LED-lightning in horticulture. *Horticultural Science* 43:1947-1950
- Neill, S.O. & Gould, K.S. 2003. Anthocyanins in leaves: Light attenuators or antioxidants? *Functional Plant Biology* 30(8):865-873

- Nishio, J.N. 2000. Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant, Cell and Environment* 23:539-548
- Oda, M. & Aoki, S. 1988. Application of monitoring fresh weight to analyzing growth responses to air temperature and light intensity in leaf lettuce. *Acta Horticulturae* 230:451-458
- Oda, M. & Tsuji, K. 1992. Monitoring Fresh Weight of Leaf Lettuce. *Japan International Research Center for Agricultural Sciences* 26:19-25
- Ono, E. & Watanabe, H. 2006. Plant factories blossom – Production in Japan steadily flowers. *Resource* 13:13-14
- Peet, M.M. 1999. Greenhouse Crop Stress Management. *Acta Horticulturae* 481:643-654
- Pinho, P. 2008. Usage and control of solid-state lightning for plant growth. PhD Thesis. Report 49. Helsinki University of Technology, Department of Electronics, Lighting Unit, Espoo.
- Pinho, P. 2010. Henkilökohtainen tiedonanto, Helsinki, Viikki, 18.3.2011.
- Pinho, P., Hytönen, T., Rantanen, M., Elomaa, P. & Halonen, L. 2012. Dynamic control of supplemental lightning intensity in a greenhouse environment. *Lighting Research & Technology* 0:1-10.
- Pinho, P., Rantanen, M., Hytönen, T., Mouhu, K., Palonen, P., Elomaa, P., Halonen, L., 2010. "Horticultural LED Lighting – After all, Warm Might Be Better". *Sähkö & Tele - Lehti*, 8:31-32. <http://www.sil.fi/lehdet/st82010/>. Julkaistu 8.2010, viitattu 2012.
- Qian, L. & Kubota, C. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany* 67:59-64
- Quail, P., Boulton, M., Parks, B., Short, T. & Wagner, D. 1995. Phytochromes; Photosensory Perception and Signal Transduction. *Science* 268:675-680
- Rajapakse, N.C & Kelly, J.W. 1995. Spectral filters and growing season influence growth and carbohydrate status of chrysanthemum. *Journal of American Society of Horticultural Science* 120(1):78-83
- Sager, J.C. 1984. Spectral effects on the growth of lettuce under controlled environment conditions. *Acta Horticulturae* 148:89-896
- Saure, M.C. 1998. Causes of the Tipburn disorders of the leaves of vegetables. *Scientia Horticulturae* 76:131-147
- Schmitz-Eisenberger, M. & Noga, G. 2001. UV-B-radiation-influence on antioxidative components in *Phaseolus vulgaris* leaves. *Journal of Applied Botany* 75:210-215
- Schultz, T.F., Kiyosue, T., Yanovsky, M., Wada, M. & Kay, S.A. 2001. A role for LKP2 in the circadian clock of *Arabidopsis*. *Plant Cell* 13:2659-2670

- Sellaro, R., Crepy, M., Trupkin, S.A., Karayekov, E., Buchovsky, A.S., Rossi, C. & Casa, J.J. 2010. Cryptochrome as a Sensor of the Blue/Green Ratio of Natural Radiation In *Arabidopsis*. *Plant Physiology* Vol. 154:401-409
- Shalitin, D., Yang, H., Mockler, T., Maymon, M., Guo, H., Whitelam, G. & Lin, C. 2002. Regulation of *Arabidopsis* cryptochrome 2 by blue-light-dependent phosphorylation. *Nature* 417:763-767
- Shalitin, D., Yu, X., Maymon, M., Mockler, T. & Li, C. 2003. Blue Light-Dependent in Vivo and in Vitro Phosphorylation of *Arabidopsis* Cryptochrome 1. *The Plant Cell* 15: 2421-2429
- Sharrock, R. & Quail, P. 1989. Novel phytochrome sequences in *Arabidopsis thaliana*: structure, evolution, and differential expression of a plant regulatory photoreceptor family. *Genes & Development* 3:1745-1757
- Shibata, T., Iwao, K. & Takano, T. 1995. Effect of Vertical air flowing on lettuce growing in a plant factory. *Acta Horticulturae* 399:175-183
- Shimizu, H., Kushida, M. & Fujinuma, W. 2008. A Growth Model for Leaf Lettuce under Greenhouse. *Environment Control in Biology* 46(4):211-219
- Smith, H. & Whitelam, G.C. 1997. The shade avoidance syndrome: multiple responses mediated by multiple phytochromes. *Plant, Cell & Environment* 20:840-844
- Somers, D.E., Schultz, T.F., Milnamow, M. & Kay, S.A. 2000. *ZEITLUPE* Encodes a Novel Clock-Associated PAS Protein from *Arabidopsis*. *Cell*, Vol.101:319-329
- Sun, J., Nishio, J.N. & Vogelmann, T.C. 1998. Green light drives CO₂ fixation deep within leaves. *Plant and Cell Physiology* 39:1020-1026
- Stutte, G.W. & Edney, S. 2009. Photoregulation of Bioprotectant Content of Red Leaf lettuce with Light-emitting Diodes. *American Society for Horticultural Science* 44(1):79-82
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2006. *Plant Physiology*. 4th Edition. Sunderland, Massachusetts, USA: Sinauer Associates. 764 s.
- Tazawa, S. 1999. Effects of various radiant sources on plant growth (part 1). *Japan Agricultural Research Quarterly* 33:163-176
- Terashima, I., Fujita, T., Inoue, T., Chow, W.S & Oguchi, R. 2009. Green Light Drives Leaf Photosynthesis More Efficiently than Red Light in Strong White Light: Revisiting the Enigmatic Question of Why Leaves are Green? *Plant and Cell Physiology* 50(4):684-697
- Tibbits, T.W. & Rao, R.R. 1968. Light Intensity and Duration in the Development of Lettuce Tipburn. *American Society for Horticultural Science* 93:454-461
- Tsormpatsidis, E., Henbest, R.G.C., Davis, F.J., Battey, N.H., Hadley, P. & Wagstaffe, A. 2008. UV irradiance as a major influence on growth, development and secondary

products of commercial importance in Lollo Rosso lettuce 'Revolution' grown under polyethylene films. *Environmental and Experimental Botany* 63:232-239

Trouwborst, G., Oosterkamp, J., Hogewoning, S.W., Harbinson, J. & van Ieperen, W. 2010. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum* 138:289-300

van Ieperen, I. & Trouwborst, G. 2008. The application of LEDs as assimilation light source in greenhouse horticulture: a simulation study. *Acta Horticulturae* 801:1407-1414

van Iersel, M.W. 2003. Carbon use efficiency depends on growth respiration, maintenance respiration, and relative growth rate. A case study with lettuce. *Plant Cell and Environment* 26:1441-1449

Voipio, I. & Autio, J. 1991. Lisävalon määrän ja laadun vaikutus lehtisalaatin kasvuun ja kustumukseen. Teoksessa: Helsingin puutarhatieteen laitoksen julkaisuja 21. Tekovalon hyödyntäminen lehtisalaatin ja leikkoperennojen viljelyssä. Helsinki: Helsingin Yliopisto. s.19-41

Voipio I. & Autio J. 1995. Response of Red-leaved Lettuce to Light Intensity, UV-A Radiation and Root Zone Temperature. *Acta Horticulturae*, 399:83-187

Vänninen, I., Pinto, D.M., Nissinen, A.I, Johansen, N.S. & Shipp, L. 2010. In the light of new greenhouse technologies: 1. Plant mediated effects of artificial lighting on arthro-pods and tritrophic interactions. *Annals of Applied Biology* 157:393-414.

Wang, H., Gu, M., Cui, J., Shi, K. & Yu, J. 2009. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. *Journal of Photochemistry and Photobiology* 96:30-37

Whitelam, G.C & Halliday, K.J. 2007. Light and Plant Development, *Annual Plant Reviews*, Volume 30. Oxford, USA: Blackwell Publishing Ltd. 325s.

Zolnier, S., Gates, R.S., Buxton, J. & Mach, C. 2000. Psychrometric and ventilation constraints for vapour pressure deficit control. *Computers and Electronics in Agriculture* 26(3):343-359

LIITE 1. Veden pH- arvon, lämpötilan ja johtoluvun seuranta HPS-, DLC ja LED- valaisimien koealueilla ensimmäisen kokeen ajalta jääsalaateilla. Mittaukset tehtiin kolme kerta viikossa ja lannoitetta lisättiin niin, että johtoluku asettui halutulle tasolle. Taulukkoon on merkitty johtoluku mahdollisen lannoitteen lisäyksen jälkeen.

Pvm		HPS	DLC	LED
24.9.	pH	8,06	8,12	8,10
	Alkutilanne EC (mS)	0,15	0,15	0,15
	lpt (C°)	16,80	14,60	13,50
24.9	pH	6,73	6,73	6,76
	Lannoite lisätty EC (mS)	1,60	1,60	1,40
	lpt (C°)	20,80	23,20	23,60
27.9	pH	7,07	7,22	7,46
	EC (mS)	1,60	1,60	1,50
	lpt (C°)	23,30	22,70	22,60
29.9	pH	6,69	6,97	7,15
	EC (mS)	1,70	1,80	1,70
	lpt (C°)	24,20	23,80	23,40
1.10	pH	6,36	6,50	6,77
	EC (mS)	1,80	1,80	1,90
	lpt (C°)	24,10	23,70	23,30
4.10	pH	6,57	6,49	6,43
	EC (mS)	1,70	1,70	1,90
	lpt (C°)	23,60	22,60	22,60
6.10	pH	6,73	6,81	6,66
	EC (mS)	1,70	1,70	1,80
	lpt (C°)	23,40	23,20	23,10
8.10	pH	6,98	6,95	6,87
	EC (mS)	1,70	1,70	1,80
	lpt (C°)	23,60	22,90	22,40
11.10	pH	7,23	7,13	6,94
	EC (mS)	1,70	1,70	1,80
	lpt (C°)	22,50	22,30	21,80
13.10	pH	7,25	7,27	7,27
	EC (mS)	1,80	1,80	1,70
	lpt (C°)	22,20	22,20	21,60
15.10	pH	7,49	7,50	7,44
	EC (mS)	1,70	1,70	1,70
	lpt (C°)	22,70	22,50	21,70
18.10	pH	7,36	7,35	7,39
	EC (mS)	1,70	1,70	1,70
	lpt (C°)	24,60	23,90	22,80
19.10	pH	8,46	8,10	8,30
	Vedenvaihto EC (mS)	1,70	1,60	1,40
	lpt (C°)	24,20	23,60	22,60
20.10	pH	6,91	7,03	6,83
	EC (mS)	1,90	1,80	1,80
	lpt (C°)	22,40	22,00	22,20
22.10	pH	6,63	6,85	7,00
	EC (mS)	1,80	1,80	1,80
	lpt (C°)	23,10	22,70	21,80
25.10	pH	7,34	7,40	7,39
	EC (mS)	1,70	1,70	1,70
	lpt (C°)	23,60	23,10	22,00
27.10	pH	7,12	7,03	6,91
	EC (mS)	1,70	1,70	1,70
	lpt (C°)	23,20	22,80	22,10
29.10	pH	7,53	7,30	6,91
	EC (mS)	1,70	1,70	1,70
	lpt (C°)	24,10	23,30	22,40

LIITE 2. Veden pH- arvon, lämpötilan ja johtoluvun seuranta HPS-, DLC ja LED- valaisimien koealueilla toisen kokeen ajalta tammenlehtisalaateilla. Mittaukset tehtiin kolme kerta viikossa ja lannoitetta lisättiin niin, että johtoluku asettui halutulle tasolle. Taulukkoon on merkitty johtoluku mahdollisen lannoitteen lisäyksen jälkeen.

Pvm		HPS	DLC	LED
6.11	pH	7,73	7,63	8,12
	Alkutilanne EC (mS)	0,36	0,33	0,26
	lpt (C°)	22,30	21,70	21,70
6.11	pH	7,32	7,30	7,22
	Lannoite lisätty EC (mS)	1,72	1,75	1,58
	lpt (C°)	22,30	21,70	21,70
8.11	pH	7,34	7,58	7,55
	EC (mS)	1,72	1,75	1,79
	lpt (C°)	24,10	23,40	22,90
10.11	pH	6,45	6,99	7,51
	EC (mS)	1,75	1,76	1,80
	lpt (C°)	23,70	23,20	22,00
12.11	pH	5,95	5,94	6,20
	EC (mS)	1,73	1,75	1,79
	lpt (C°)	23,40	22,50	22,00
15.11	pH	6,20	6,23	5,86
	EC (mS)	1,78	1,78	1,78
	lpt (C°)	23,30	22,60	22,10
17.11	pH	6,45	6,46	6,33
	EC (mS)	1,78	1,79	1,79
	lpt (C°)	22,90	22,30	21,70
19.11	pH	6,70	6,70	6,36
	EC (mS)	1,80	1,77	1,77
	lpt (C°)	22,90	22,20	21,90
22.11	pH	7,19	7,17	6,90
	EC (mS)	1,75	1,74	1,74
	lpt (C°)	23,00	22,10	21,70
24.11	pH	7,34	7,30	7,02
	EC (mS)	1,77	1,77	1,77
	lpt (C°)	22,90	22,50	21,80
26.11	pH	6,98	7,01	6,91
	Veden vaihto EC (mS)	1,80	1,77	1,76
	lpt (C°)	22,60	22,50	21,70
29.11	pH	6,36	6,46	6,52
	EC (mS)	1,80	1,79	1,79
	lpt (C°)	22,90	22,60	22,00
1.12	pH	6,70	6,46	5,72
	EC (mS)	1,83	1,82	1,79
	lpt (C°)	22,80	22,20	21,90
3.12	pH	7,06	6,72	6,74
	EC (mS)	1,79	1,81	1,80
	lpt (C°)	22,50	21,90	21,40
7.12	pH			
	EC (mS)	1,88	1,92	1,92
	lpt (C°)	22,50	22,40	22,40

LIITE 3. Kauppapuutarhaliiton ruukkuvihannesjaoston laatuohje ruukkusalaateille ja ruukkuyrteille

Kauppapuutarhalitto ry, ruukkuvihannesjaosto 2009

LEHDENREUNAPOLTE, esimerkkejä:

LEHTISALAATTI



Ei sallittu (3)



Rajatapaus (2)



Sallittu (1)

JÄÄSALAATTI



Ei sallittu (3)

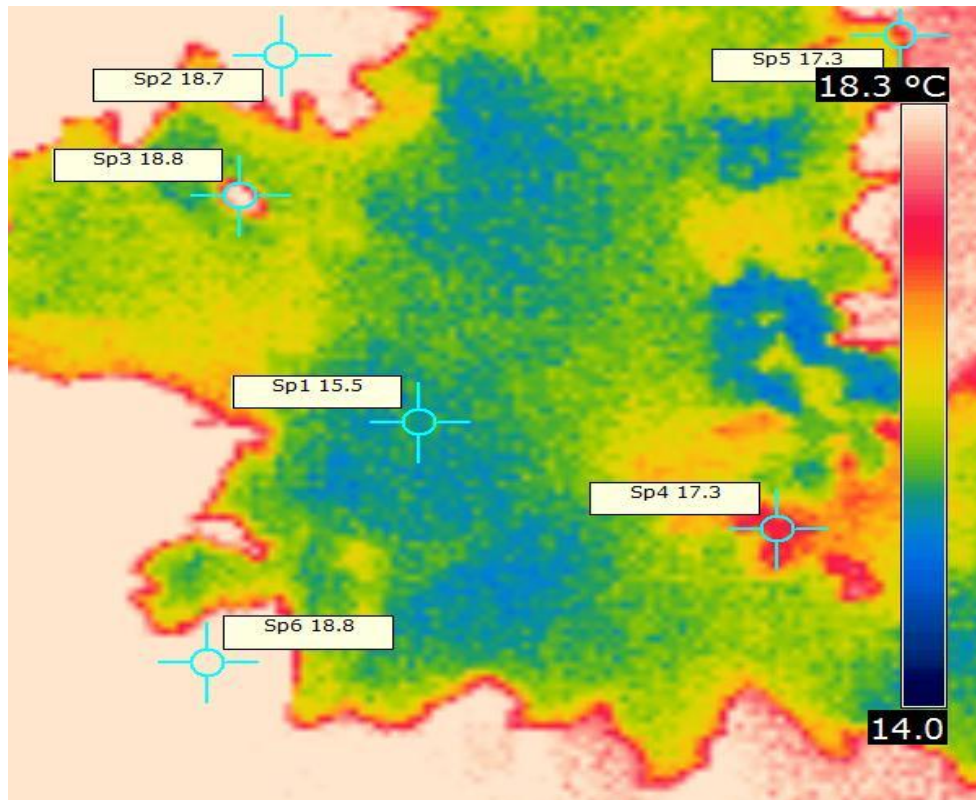


Rajatapaus (2)

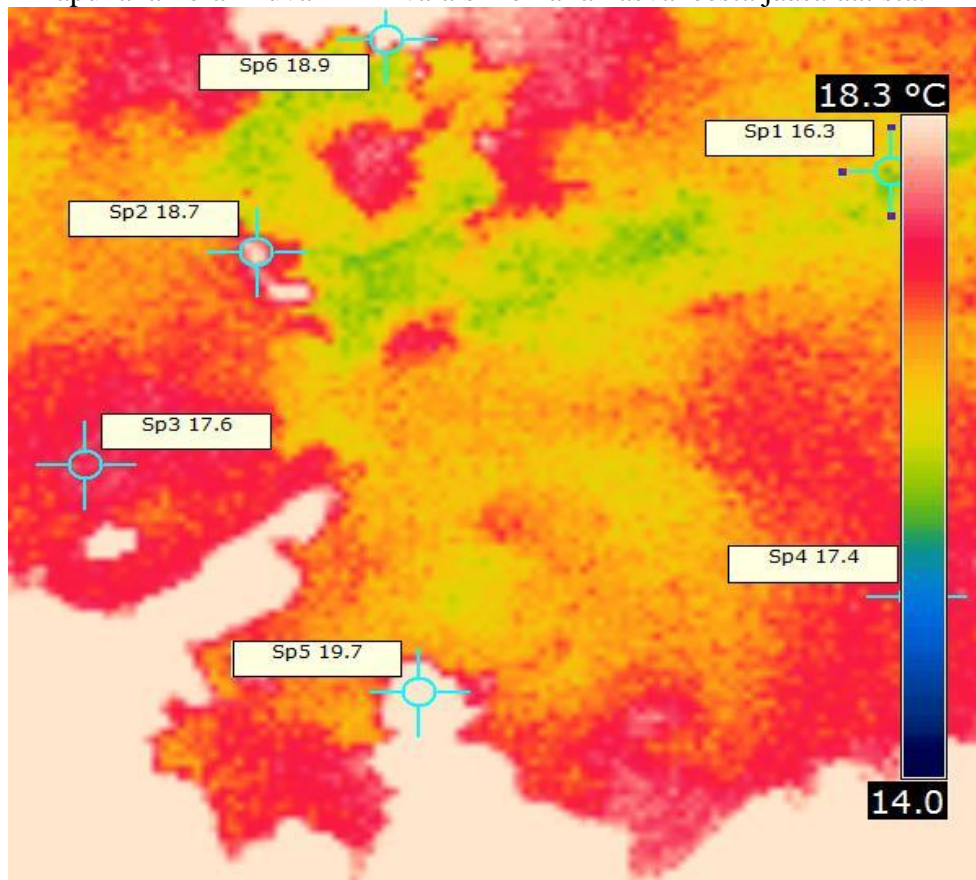


Sallittu (1)

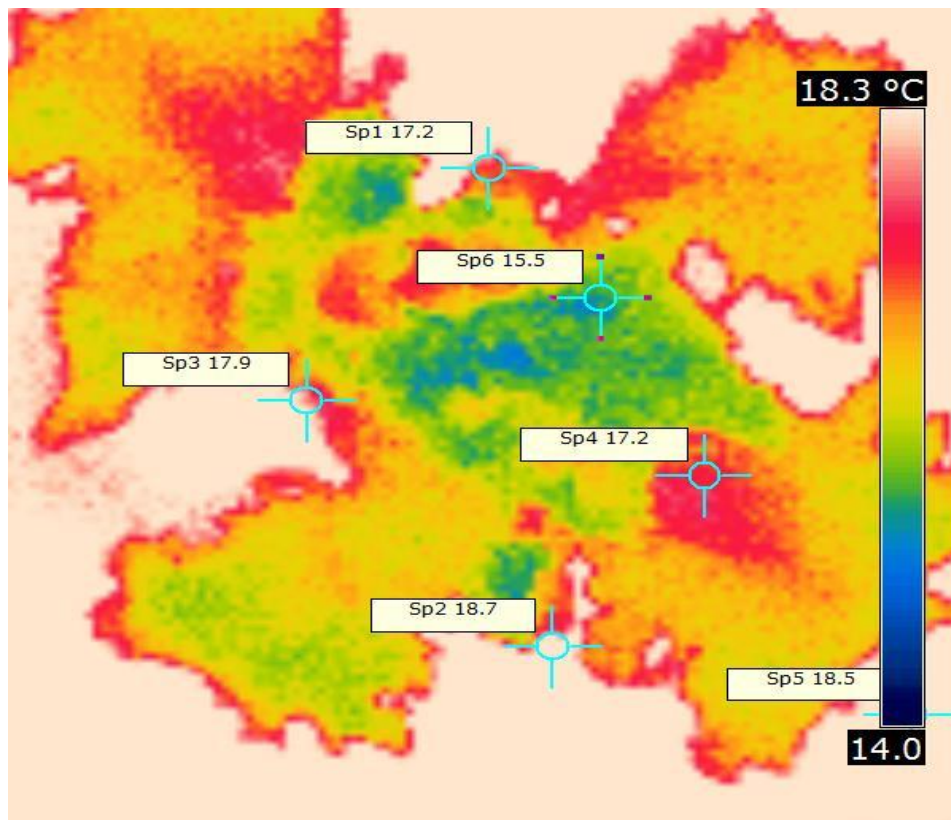
LIITE 4. Infrapunakameralla otettuja kuvia jääsalaattien lehden lämpötiloista. Salaatin reunat näkyvät selkeästi kuvissa. Ulkopuolelle jäävän alueen lämpötila on yli 18°C.



Infrapunakameran kuva LED- valaisimen alla kasvaneesta jääsalaatista.



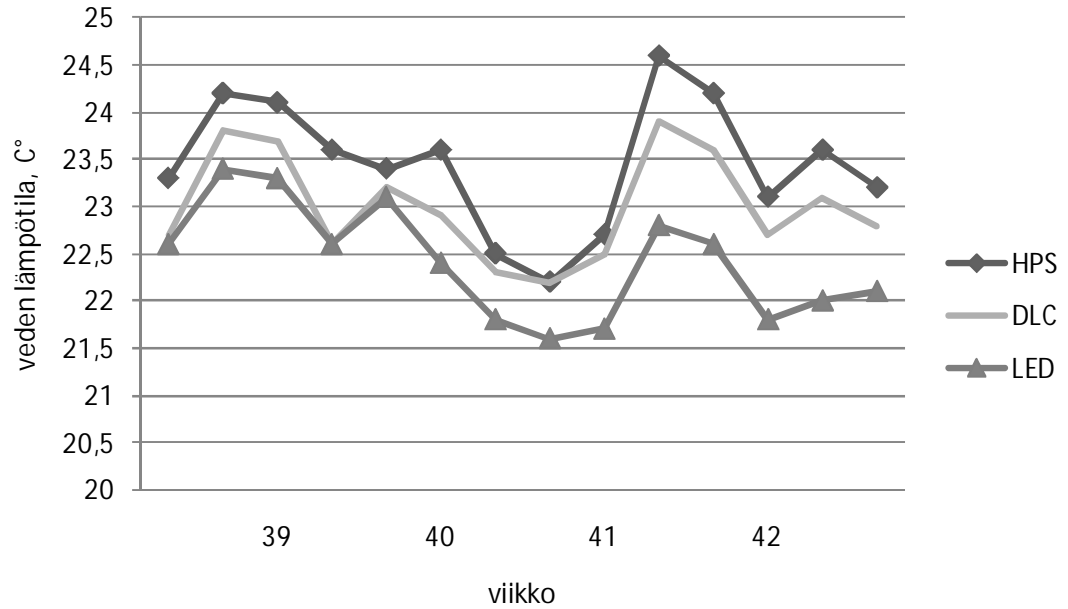
Infrapunakameran kuva HPS- valaisimen alla kasvaneesta jääsalaatista



Infrapunakameran kuva DLC- valaisimen alla kasvaneesta jääsalaatista.

LIITE 5.

Veden lämpötila ensimmäisen kokeen aikana mitattuna HPS-, DLC- ja LED-valaisimien kasteluvesien 180 litran tankeista. Lämpötila mitattiin kolme kertaa viikossa.



Veden lämpötila toisen kokeen aikana mitattuna HPS-, DLC- ja LED- valaisimien kasteluvesien 180 litran tankeista. Lämpötila mitattiin kolme kertaa viikossa.

